

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**ESTUDIO DE VARIABILIDAD EN RETENCIÓN DE FÓSFORO EN LA
SERIE PELCHUQUÍN, REGIÓN DE LOS RÍOS, CHILE.**

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Agronomía.

Patricia Alejandra Miranda Cárdenas.

VALDIVIA-CHILE

2007

PROFESOR PATROCINANTE

Roberto MacDonald H.

Ing. Agr. M. Se.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Roberto MacDonald', written over a horizontal dotted line.

PROFESOR CO- PATROCINANTE.

Dante Pinochet T.

Ing. Agr. M. Sc. Ph. D.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dante Pinochet', written over a horizontal dotted line.

PROFESOR DEFORMANTE

Juan Nissen M.

Ing. Agr. Dr.R. Hort.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Nissen', written over a horizontal dotted line.

Agradecimientos

Aunque siempre dicen "En esta etapa que culmina", quisiera pensar... "En la etapa que comienza", aunque sin olvidar a las personas que estuvieron y siempre estarán en mis pensamientos y en mi corazón.

Por lo cual, expreso mis agradecimientos a todos, en especial a mis padres Héctor Miranda y Rosa Cárdenas, por ser el pilar fundamental de mi vida y por darme las herramientas para ser cada día una mejor persona y una buena profesional, a mis hermanos Yery Miranda y Marcelo Miranda, a mi hijito Franco, a mi pololo Andrés Espinoza, a mi cuñado Teo, a mis compañeros y amigos de tantos años, en especial a Paula Vega, Angélica Díaz, Jeannette Jaramillo, Patty Porflidtt, Lorena Pacheco, Marcelo labra, Pablo Gil, Martín Berrocal, entre otros.

Sin duda también recordaré a las personas que me ayudaron día a día en el Instituto. Al dúo dinámico "Olguita y Rut" siempre con la disposición a ayudar. A Jerman Carrasco y Susana Valle, gran pareja y unos grandes amigos. Como olvidar a Marielena, Claudia, Osvaldo personas muy especiales.

A mis profesores Don Roberto Macdonald, profesor Dante Pinochet y Profesor Juan Nissen, por su constancia y paciencia.

A Don Luis San Martín, por ser una excelente persona y profesional.

No quisiera olvidar, un agradecimiento un poco más lejano, aunque sé que en algún lugar del cielo, seguro está haciendo ciencia... .gracias profesor Dr. Achim Ellies S.!!! (1944-2004)

Un saludo especial a todos los que quieran leer esta tesis, y una recomendación

"La ciencia avanza a pasos y no a saltos" (Thomas Macaulay), por tanto, seguro encontrarán una base para el estudio de variabilidad espacial, pero el resto depende de Uds.

"Solo la propia y personal experiencia hace al hombre sabio"

(Sigmund Freud)

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	2
2.1	Suelos volcánicos	2
2.1.1	Andisoles	3
2.2	Serie Pelchuquín	3
2.3	Fósforo	6
2.3.1	Adsorción de fosfato	6
2.3.2	Adsorción de fósforo por suelos volcánicos chilenos	7
2.3.3	Relación entre fijación de fósforo y aluminio extractable	9
2.4	Variabilidad y dependencia espacial	10
2.4.1	Variabilidad espacial	10
2.4.2	Componentes de la variabilidad	11
2.4.2.1	Variabilidad sistemática	11
2.4.2.2	Variabilidad aleatoria	12
2.4.3	Dependencia espacial	12
2.5	Estadística paramétrica	13
2.5.1	Media	13
2.5.2	Varianza y desviación estándar	13
2.5.3	Coefficiente de variación	14
2.5.4	Distribución normal	14
2.5.4.1	Coefficiente de simetría o Skewness	15
2.5.4.2	Coefficiente de kurtosis	15
2.6	Estadística no paramétrica	16
2.6.1	Geoestadística	16
2.6.2	Variable aleatoria regionalizada	17
2.6.3	Hipótesis de la geoestadística	18
2.6.3.1	Estacionalidad estricta o de primer orden	18

Capítulo		Página
2.6.3.2	Estacionaridad de segundo orden	19
2.6.3.3	Hipótesis intrínseca	19
2.7	Análisis estructural	20
2.7.1	Semivarianza	20
2.7.2	Covarianza y autocorrelación	20
2.7.2.1	Índice de moran	21
2.7.3	Estudio variográfico	22
2.7.3.1	Tipos de semivarianza	24
2.7.3.1.1	Semivarianza transicionales	24
2.7.3.1.2	Semivarianza no transicionales	24
2.7.4	Parámetros de semivariograma	24
2.7.4.1	Efecto pepita (Nugget)	25
2.7.4.2	Meseta (Sill)	25
2.7.4.3	Alcance o umbral (Range)	26
2.7.5	Modelo teórico de semivariograma	26
2.7.5.1	Modelo Esférico	26
2.7.5.2	Modelo Exponencial	26
2.7.5.3	Modelo Gaussiano	26
2.7.5.4	Modelo Lineal	26
2.8	Isotropía y anisotropía	27
2.8.1	Tipos de anisotropía	28
2.8.1.1	Anisotropía geométrica	28
2.8.1.2	Anisotropía zonal	28
2.9	El kriging	29
2.9.1	Estimación de kriging	30
3	Material y método	31
3.1	Materiales	31
3.1.1	Instrumentos de muestreo en terreno	32

Capítulo		Página
3.1.2	Materiales utilizados en laboratorio	32
3.1.2.1	Periodo de secado de muestra	32
3.1.2.2	Proceso de incubación	32
3.1.2.3	Etapas de análisis químico (P- Olsen y capacidad tampon)	32
3.1.2.4	Reactivos	32
3.1.3	Programas computacionales	33
3.2	Método	33
3.2.1	Método de muestreo	33
3.2.2	Sector de toma de muestra	33
3.2.3	Análisis químico para capacidad de retención de fósforo	34
3.2.4	Análisis estadístico	35
3.2.4.1	Análisis estadístico tradicional	35
3.2.4.2	Análisis geoestadístico	35
3.2.5	Análisis de superficie	36
4	presentación y discusión de resultados	37
4.1	Análisis estadístico tradicional	37
4.1.1	Promedio, valores máximos y mínimos	37
4.1.2	Varianza y desviación estándar	38
4.1.3	Coefficiente de variación	39
4.1.4	Coefficiente de Skewness o simetría y kurtosis	39
4.1.5	Histograma de frecuencia	41
4.2	Análisis geoestadístico	43
4.2.1	Semivariograma	43
4.2.1.1	Modelo	44
4.2.1.2	Efecto pepita (Nugget)	47
4.2.1.3	Rango de dependencia espacial	47
4.2.1.4	Análisis de anisotropía	48
4.2.2	Correlograma	48
4.3	Análisis de superficie	52

Capítulo		Página
4.4	Correlación entre aluminio extractable y capacidad de fijación de fósforo.	55
5	CONCLUSIÓN	57
6	RESUMEN	59
	SUMARY	60
7	BIBLIOGRAFIA	61
	ANEXOS	66

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Característica química y física de los suelos de la serie Pelchuquín.	31
2	Resumen de estadígrafos generales de la variable en estudio.	37
3	Valores de varianza y desviación estándar de adsorción de fósforo para profundidad de 0-10 cm Y 10-20 cm.	38
4	Valores de coeficiente de variación (%) determinados para retención de fósforo.	39
5	Coeficiente de Skewness y kurtosis para adsorción de fósforo en profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm.	39
6	Parámetros geoestadísticos utilizados para el estudio de variabilidad y dependencia espacial, para análisis de retención de fósforo.	44
7	Análisis de Moran de adsorción de fósforo, para la profundidad de 0-10 cm.	51
8	Análisis de Moran de adsorción de fósforo, para la profundidad de 10- 20 cm.	51

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Relación entre aluminio extractable (mg/kg) y la capacidad de retención de fósforo (mg/kg/mg/kg).	10
2	Autocorrelograma.	21
3	Grafico de direcciones para calculo de los semivariograma a-comenzando de 0°, b- comenzando de 45°.	23
4	Variograma típico.	25
5	Semivariogramas experimentales y modelos de Semivarianza.	27
6	Tipos de anisotropía.	29
7	Histograma de frecuencia para retención de fósforo a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm.	42
8	Semivariograma ajustado de retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm.	46
9	Correlogramas de retención de fósforo para las profundidades de 0.10 cm y 10-20 cm, respectivamente.	50
10	Mapa de contorno para capacidad de retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm.	53
11	Mapa de contorno para capacidad de retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm.	54
12	Gráfico de correlación entre aluminio extractable (mg/kg) y capacidad de fijación de fósforo (mg/kg/mg/kg) a la profundidad de 0-10 cm.	55
13	Gráfico de correlación entre aluminio extractable (mg/kg) y capacidad de fijación de fósforo (mg/kg/mg/kg) a la profundidad de 10-20 cm.	56

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Concentraciones de retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm y sus respectivas coordenadas geográficas.	67
2	Concentraciones de retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm y sus respectivas coordenadas geográficas.	71
3	Tablas de ángulos de rotación para análisis de anisotropía para retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm.	76
4	Tablas de ángulos de rotación para análisis de anisotropía para retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm.	77
5	Resultados de análisis de anisotropía para retención de fósforo a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente.	78
6	Datos aluminio extractable para serie Pelchuquín.	79

1. INTRODUCCION

Muchos estudios establecen que las propiedades del suelo, tanto físicas como químicas, se caracterizan por poseer una gran heterogeneidad, la cual, se puede encontrar hasta en pequeñas aéreas. Esta característica provoca una variabilidad en las propiedades de suelo y puede llegar a ser de considerable magnitud, lo que afectaría los pronósticos que se hagan de ella.

La variabilidad de las propiedades del suelo es una cualidad inherente al mismo, debido a que en su formación influyen varios procesos distintos, controlados a su vez por los agentes de formación. Estas interacciones pueden ser muy variadas, dando como resultado una gran variedad de suelos.

La herramienta desarrollada para el estudio de variabilidad en suelos es la geoestadística, con la cual se evalúan los cambios graduales de suelo dentro de sus límites y también, estimar los atributos de los suelos en sitios no muestreados.

En estudios anteriores se ha usado el aluminio extractable como elemento de comprobación de la homogeneidad de la serie Pelchuquín, basado en que este, está estrechamente relacionado con las características del material generador. También se ha establecido una relación entre retención de fósforo y Aluminio extractable, por lo cual, se determinará si esta relación se presenta en la serie.

El concepto de serie de suelo, conlleva implícita un grado de homogeneidad en parámetros que definen una serie de suelo en si misma. Usualmente, la variabilidad de estos parámetros no deben seguir patrones de distancia y dirección en parámetros permanentes, ya que de hacerlo, desafía el concepto de serie en si mismo.

Por ello, al considerar una serie de suelo reconocida como homogénea por sus características específicas y baja representatividad geográfica, es muy poco probable que presente variación en parámetros permanentes que define el concepto serie.

En este trabajo se quiere estudiar la variabilidad espacial de la fijación de fósforo en un suelo considerado homogéneo, además de estimar, si existe correlación entre aluminio extractable y fijación de fósforo.

La hipótesis es la siguiente: “La serie Pelchuquín es una unidad homogénea, y como tal no presenta variabilidad asociada a la distancia o la dirección de muestreo en parámetros que definen el concepto central de la serie”.

El objetivo general de este estudio es determinar la variabilidad espacial de la retención de fósforo en una serie de suelo considerada homogénea.

En cuanto a los objetivos específicos se tiene: (i) Determinar el tipo de variabilidad de retención de fósforo en la serie Pelchuquín. (ii) Determinar la correlación que existe entre aluminio extractable y la fijación de fósforo.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Suelos volcánicos

Los suelos derivados de ceniza volcánica ofrecen una serie de particularidades que los diferencia profundamente de los suelos provenientes de otros materiales: tiene una distribución geográfica específica, posee un origen en común y exhiben propiedades características. Sin embargo, al hablar de estos suelos conviene precisar lo que se entiende por suelo y ceniza volcánica (TOSSO, 1985).

Se sabe que a la ceniza volcánica puede dar origen a suelos muy diversos, como podsoles, oxisoles, latosoles, regosoles y otros, según las condiciones e intensidad con que actúen los factores en formación: Clima, vegetación, topografía, organismo y tiempo. Existe un grupo de suelos que tienen unos derivados genéticos comunes y que se identifica como ceniza volcánica como material parental a través de propiedades características y diagnósticas: los Andisoles (FAO, 1968-1975, citado por TOSSO, 1985). Los Andisoles, sin duda, representan la unidad modal más características de los suelos derivados de ceniza volcánica (TOSSO, 1985).

Los suelos volcánicos desarrollados en la zona central y centro – sur de Chile, se denominan, trumaos, ñadis, pardos arcillosos, rojos arcillosos, pumiciticos. Todos provienen de materiales piroclásticos que incluyen cenizas, arenas, pómez, y pueden ser depositados en forma o formas retransportadas de los materiales: aluvium, eolium. (Besoain, 1969, citado por TOSSO, 1985).

2.1.1 Andisoles

En América, los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) cubren áreas de América del norte, América central y América del sur. La fracción arcilla de estos suelos está dominada por alofán, imogolita y hallosita (minerales de rango corto) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de depositaciones volcánicas recientes (ESPINOSA, 1991).

Estos suelos tienen alto potencial para la producción agrícola y por ello muchas de las regiones más productivas del mundo están localizadas cerca de volcanes activos o dormantes, al igual que las regiones más densamente pobladas en Japón están ubicadas cerca de los volcanes (SHOJI, 1993).

Una de las características más importante de los Andisoles es su capacidad para retener fósforo (P) en la superficie de los minerales amorfos. Esta es la principal limitante química de los andisoles (ESPINOSA, 1991).

Otra característica de los Andisoles es el elevado contenido de vidrio o fragmento impregnado con vidrio, en su fracción arena. El vidrio conjuntamente con olivino poco alterados, piroxenos y elevada cantidad de plagioclasa, son indicativas de la juventud de estos depósitos (TOSSO, 1985).

Para maximizar la productividad de los suelos de ceniza volcánica y minimizar la deterioración de estos, es necesario un apropiado manejo, basado en un conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Shoji, 1993, citado por VERA, 2004).

2.2 Serie Pelchuquín

Los suelos de esta serie se ubican en la depresión de San José a una altura promedio de 20- 30 metros sobre el nivel del mar y se presentan en forma de depósitos de ceniza volcánicos sobre una toba más o menos cementada y mezclada con clastos alterados que se denominan localmente “cancagua”. La topografía es casi plana con pendiente compleja de 1 a 3% (IREN-UACH, 1978).

Son suelos profundos a moderadamente profundos, de clases texturales franco limosa a franco arcillo limosa y colores pardo rojizo oscuro a pardo muy oscuro en superficie, friables, bien drenados y tienen menos de $6 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de arcilla de bases intercambiables más acidez intercambiable en algún horizonte sub-superficial (característica vélica) (SALAZAR *et al.*, 2005).

El análisis químico elemental muestra la presencia de cantidad apreciable de fierro y magnesio que probablemente provengan de materiales fierros magnesianos inestables como olivino (IREN-UACH, 1978).

La mayor parte de la fracción arcillosa está constituida por materiales amorfos especialmente alofán. Es posible observar pequeños cantidades de gibssita, metahalosita e hissingerita, las que aumentan ligeramente en profundidad (IREN-UACH, 1978).

Lo anterior se confirma en el análisis de arenas que muestra una heterogeneidad en las relaciones turmalina / horblenda y minerales livianos/ minerales pesados, lo que seria índice de depositación de material cineriticos diferentes (IREN-UACH, 1978).

En esta fracción es posible observar feldespatos, nódulos duros y vidrio volcánico en abundancia, junto a cuarzo. Se presentan además pequeñas cantidades de moscovita, epidota, piroxenos, magnetita, olivino, turmalina, clorita, granate y limonita (IREN-UACH, 1978).

De los valores promedios de densidad real, aparente, porosidad total y constante hídrica se desprende que este suelo presenta muy buenas propiedades físicas (IREN-UACH, 1978).

Existe un buen equilibrio en distribución de los poros capilares y no capilares útiles, la que se confiere al suelo una buena aireación y una alta capacidad de retención de agua, la que disminuye considerablemente bajo los 30 cm presentan velocidad de infiltración promedio de 17,5 cm / hora (IREN-UACH, 1978).

Este suelo presenta bajo contenido de elementos nutritivos, niveles que van disminuyendo considerablemente en profundidad. El fósforo constituye el elemento mas critico, problema que se acentúa en los horizontes inferiores por los altos contenidos de aluminio y fierro extractable y a la presencia de arcilla alofánica (IREN-UACH, 1978).

2.3 Fósforo

El fósforo es un elemento de particular preocupación en la agricultura mundial, ya que en una importante superficie de suelos de cultivo y praderas presentan bajos contenidos disponibles y por lo tanto es un factor limitante de la producción (OPAZO, 1992).

Existe tres pool de fósforo en el suelo: fósforo en solución, fósforo lábil y el fósforo no lábil. El fósforo en solución se encuentra en el suelo preferentemente como ion ortofosfato mono y divalente y el predominio de una u otra forma es función del pH del suelo (OPAZO, 1992).

El fósforo lábil corresponde a la fracción que se encuentra en equilibrio dinámico con el fósforo de la solución (Rodríguez, 1990 citado por OPAZO 1992).

El fósforo no lábil es una forma de fósforo pasiva, y no esta disponible en forma inmediata al quedar retenido al interior de las arcillas y de óxidos de hierro y aluminio, de reacciones de precipitación muy insolubles y de reacciones irreversibles ligadas a la materia orgánica del suelo (Barrow y Shaw, 1975; Rodríguez, 1993, citados por BONOMELLI *et al.*, 2003).

2.3.1 Adsorción de fosfato

Los términos adsorción, sorción, retención y fijación de fosfato se usan indistintamente para indicar cualquier proceso en el cual estos iones en solución reaccionan con los átomos de las partículas del suelo (TOSSO, 1985).

La fijación de fósforo en el suelo es un proceso natural que puede llevar a una deficiencia de este elemento aun cuando el contenido total de fósforo en el suelo pueda ser alto. La retención de fósforo es un proceso específico de adsorción que ocurre principalmente en los suelos con altos contenidos de óxidos de hierro -hematita, goethita- y óxidos de aluminio -gibbsite- y minerales arcillosos (FAO, 2003).

La fijación de fósforo comprende reacciones de adsorción y de precipitación, predominando una u otra forma según la concentración en la solución de equilibrio, el tiempo de reacción y los minerales constituyentes, (Lin *et al*, 1983, citado por VÁZQUEZ y MORALES, 2003), no siendo posible diferenciarlos analíticamente ni matemáticamente.

Los Andisoles normalmente adsorben grandes cantidades de fosfato. Los mecanismos propuestos para explicar esta adsorción son los mismos que han postulados para los distintos componentes de estos suelos; es decir, intercambio de ligando, desplazamiento de sílice estructural y precipitación de compuestos fosfatados (Wada, 1975, citado por TOSSO, 1985).

2.3.2 Absorción de fosfato por suelos volcánicos chilenos

Los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) cubren una parte de América central y América del sur. La fracción de arcilla de estos suelos está dominado por alofán, imogolita y hallosita (minerales amorfos) que proviene de la meteorización de los materiales piroclásticos, producto de depositaciones volcánicas. Investigaciones conducidas han demostrado que el complejo humus – aluminio (Al) juega también un significativo papel en el comportamiento de los Andisoles (Sadzawka y Carrasco, 1985, citados por ESPINOSA, 1991).

Una de las características más importante de los Andisoles es la capacidad para retener fósforo (P) en la superficie de las arcillas. Aparentemente la capacidad de fijación de P de los Andisoles varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez cambia el efecto residual de las aplicaciones de fosfatos en ciertos cultivos (Sadzawka y Carrasco, 1985, citados por ESPINOSA, 1991).

La fijación de fósforo en Andisoles ocurre en las superficies activas del alofán y óxidos amorfos de hierro (Fe) y Aluminio (Al.) Los mecanismos responsables de fijación de fósforo en estos casos son: quemiadsorción, desplazamiento de sílice estructural y precipitación de compuestos fosfatados (Sadzawka y Carrasco, 1985, citados por ESPINOSA, 1991).

Las reacciones del fosfato con el complejo Al-humus no dependen del pH pero si depende marcadamente de la concentración de fosfato (Wada y Gunjitake, 1981, citado por ESPINOSA, 1991) Esto explicaría la tendencia de los andisoles de alto contenido de materia orgánica a fijar apreciables cantidades de P indefinidamente. Por otro lado, las reacciones del fosfato con la alófana son más dependientes del pH que de la concentración de fosfato en el sistema (ESPINOSA, 1991).

La importancia de la fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica ha sido señalado en numerosos trabajos y más del 80 % del fósforo suministrado ha estos suelos desaparece de la solución de suelo (Wada y Ataka, 1958, citados por SCHALSCHA, NIETO y BINGHAM, 1973).

Los factores que están en juego en este fenómeno son diversos y no cabe duda que sobre todo, los compuestos de aluminio juegan un rol importante en este contexto. Indudablemente también ciertos óxidos de hierro y, en general, los compuestos amorfos intervienen en el fenómeno de fijación (Olsen y Watanabe, 1963, citados por SCHALSCHA, NIETO y BINGHAM, 1973).

La magnitud de la adsorción es mayor, mientras más al sur se ubica el suelo (Jara, 1964; Urbina, 1965; Schalscha, 1973, citados por TOSSO, 1985).

En los horizontes superficiales, la mayor fijación de fosfato está relacionada con el contenido de materia orgánica y el aluminio extractable con NaOAc a pH 4,8 (Urbina, 1965; Silva, 1968, citados por TOSSO, 1985).

El índice de adsorción de fosfato aumenta con la profundidad de la muestra de suelo (Urbina, 1965, citado por TOSSO, 1985). Esta tendencia se ha atribuido al hecho de que al disminuir la cantidad de materia orgánica, se produce un aumento relativo simultáneo de los materiales amorfos (TOSSO, 1985).

Weinberger (1971) y Bezama y Aomine (1977), citados por TOSSO, (1985) indican que los suelos trumaos presentan índices de absorción de fosfatos mayores

que los rojos arcillosos, esto se atribuye a que la adsorción disminuye con la cristalización de los materiales inorgánicos amorfos.

2.3.3 Relación entre la fijación de fósforo y el aluminio extractable. El aluminio extractable remueve parcialmente los grupos de aluminio estructural de las arcillas y óxidos responsables de la adsorción de fósforo (Rodríguez, 1993, citado por BONOMELLI *et al.*, 2003). Además, se ha determinado que el aluminio extractable es un buen indicador de la retención o fijación de fósforo en el suelo, debido a que se relaciona con la mineralogía de las arcillas (Rodríguez, 1993, citado por BONOMELLI *et al.*, 2003).

En algunos suelos derivados de ceniza volcánica (Serie Osorno, serie Arrayán y Santa Bárbara), han demostrado que la absorción de ion ortofosfato en este tipo de suelo era mayor a medida que se aumenta la concentración de aluminio extractable (ALAMOS, *et al.*, 1976).

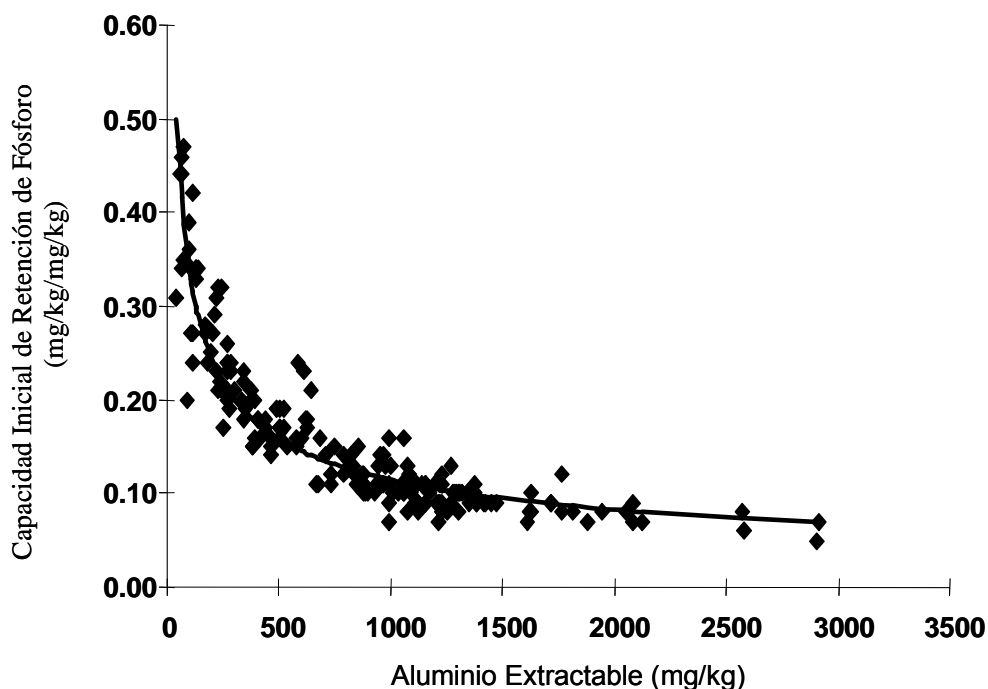


FIGURA 1: Relación entre aluminio extractable (mg/kg) y la capacidad de retención de fósforo (mg/kg/mg/kg).

FUENTE: RODRIGUEZ (1993).

2.4 Variabilidad y dependencia espacial

2.4.1 Variabilidad espacial

El conocimiento de la variabilidad de las propiedades de los suelos es esencial para hacer una interpretación y una predicción correcta del funcionamiento de estas (Acuña *et al.*, 2001, citado por BURGOS, 2003).

Los mapas con “áreas homogéneas”, no tienen la capacidad de mostrar detalles y gradientes de cambio, lo cual es posible con geoestadística (Matheron, 1971, Journel y Huibregts, 1978, citados por ECHEVERRIA, 1996), al posibilitar describir matemáticamente la variabilidad espacial de la variable y kriging (Burgos y Webster, 1980, citados por ECHEVERRIA, 1996) que permite la interpolación a sectores no muestreados.

El número de observaciones que se pueden efectuar en el área de muestreo es limitado, por lo que frecuentemente es necesario extrapolar las propiedades de puntos que son conocidas a otros que se desconocen, y ellos están críticamente condicionados por la variabilidad en la unidad representativa (ULLOA, 2003).

La exactitud de los resultados obtenidos por interpolación está asociada principalmente a las estrategias de muestreo y al cumplimiento de las hipótesis estadísticas de los modelos utilizados, en especial aquellas relacionadas con la estructura espacial de los atributos en estudio. Estos aspectos comúnmente son tratados a través del análisis estadístico exploratorio, cuyo objetivo es describir las características globales del conjunto de datos y detectar patrones de regularidad espacial (Kitanidis, 1997, citado por MIRANDA, 2004).

Las variaciones espaciales pueden estudiarse a través de técnicas geoestadísticas que permiten elaborar mapas y delimitar áreas de manejo diferencial (Cambardella *et al.*, 1996, Ortega *et al.*, 1999, citados por MELCHIORI *et al.*, 2003).

2.4.2 Componentes de la variabilidad. La variabilidad presenta dos componentes, uno sistemático y uno aleatorio (JARAMAL, 2002).

2.4.2.1 Variabilidad sistemática. Cambio gradual o claro en las propiedades del suelo, que pueden ser entendidos en términos de factores de formación de suelo (o procesos) a una escala dada de observación. Es decir, estos operan e interactúan sobre un continuo de escalas espaciales y temporales. Los procesos actúan sobre grandes distancias (clima) o por largos periodos de tiempo (intemperización) siendo a su vez modificados por procesos locales, erosión y depositación de materiales (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Las fuentes de variación sistemática son topografía, litología, clima, actividad biológica, edad del suelo, composición fisicoquímica del suelo, manejo de los suelos, desmonte, cultivos y nivelación de tierras (JAMARAL, 2002).

2.4.2.2 Variabilidad aleatoria. Asociada a la variabilidad aleatoria están las distintas observaciones en las propiedades del suelo que no están conectadas a causas conocidas, existiendo fuentes de variación espacial, temporal y medición que no pueden discernirse por la naturaleza o escala de la investigación. La heterogeneidad inexplicable se denomina variabilidad aleatoria, azar o ruido (JARAMAL, 2002).

2.4.3 Dependencia espacial

La dependencia espacial ha sido reconocida desde hace décadas para muchas características de los suelos (Trangmar *et al.*, 1985 citado por PONCE *et al.*, 1999) y se manifiesta mas fuertemente en las características químicas, que son las que más varían (Webster, 1985 citado por PONCE *et al.*, 1999).

Los procedimientos estadísticos clásicos en los cuales se basa el muestreo de suelo asumen que las observaciones en el campo son independientes una de la otra no importando la ubicación en el terreno (ORTEGA y FLORES, 1999).

Sin embargo, debido a la naturaleza continua del paisaje, procesos de formación de suelo, y zonas climáticas, es razonable esperar que exista autocorrelación (dependencia) espacial. Es decir que muestras tomadas cerca una de otras sean más parecidas, que muestras tomadas a mayor distancia entre ellas (ORTEGA y FLORES, 1999).

La cuantificación de la dependencia espacial de propiedades del suelo es crítica para definir estrategia de muestreo adecuadas, debido a que, por un lado, aumentando el número de observaciones no necesariamente se aumenta la exactitud del estudio, pues se puede producir información redundante, mientras que por otro si se desea interpolar lugares no muestreados dentro del potrero, se requiere dependencia espacial (ORTEGA y FLORES, 1999).

La dependencia espacial es usualmente cuantificada a través del uso de variograma. Esta es una relación entre varianza y distancia entre muestras. Cuando las muestras son independientes, la varianza entre las muestras es similar, no importando la distancia entre ellas. Sin embargo cuando las muestras son dependientes entre ellos la varianza aumenta con la distancia entre muestras (ORTEGA y FLORES, 1999).

2.5 Estadística descriptiva

Cuando un grupo de datos cumple con los supuestos de normalidad, aleatoriedad e independencia de las observaciones, la variabilidad de ellos puede ser estudiada con estimadores paramétricos como la amplitud del rango de valores, la varianza, la desviación estándar y/o el coeficiente de variación (Jamaral, 2002, citado por VERA, 2004).

2.5.1 Media. La media es el promedio aritmético del valor de los datos:

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde el número de datos es n y x_1, \dots, x_n son los valores de los datos (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.2 Varianza y desviación estándar. Cuando se tiene un conjunto de “ n ” datos la varianza se determina mediante la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

donde:

σ^2 : Varianza

n : Número de observaciones de un set de datos.

X_m : Media.

X_i : Observaciones.

Donde la raíz cuadrada de la varianza corresponde a la desviación estándar, S . La cual indica el grado de dispersión de los datos con respecto a la media (OLIVER y WEBSTER, 2001).

2.5.3 Coeficiente de variación. Es una medida de la variación relativa de los datos y puede ser calculado por:

$$CV = 100 \left(\frac{S}{X_m} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Proporciona una comparación entre la variación de grandes valores y la variación de pequeños valores (QUINTIN, 2003).

El coeficiente de variación, describe la forma de la distribución y puede indicar la presencia de algunos valores altos erráticos, que pueden llegar a tener un significativo impacto en la estimación final (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.4 Distribución normal. La distribución normal es central para la teoría estadística. Muchas variables medio ambientales, así como de suelo, están distribuidas en una vía que se aproxima a la distribución normal (OLIVER y WEBSTER, 2001). Esta es definida por una variable aleatoria continua Z en términos de una función de densidad probabilística y se define como:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(z-x_m)^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots\dots(2.4)$$

donde:

x_m = Media.

σ^2 = Varianza.

f(z)= Dado por el valor de z, es la probabilidad de densidad a z .

Muchas veces se deben hacer transformaciones para lograr una distribución normal, a menudo se logra que la varianza de la muestra se haga menos dependiente de la media y también más estable. La variabilidad espacial no permite que la medición de las diferentes propiedades en un sitio determinado sea capaz de describir un suelo, por lo que la información debe obtenerse por áreas de muchos sitios (Matte, 2000, citado por VERA 2004).

2.5.4.1 Coeficiente de simetría o Skewness. El estadístico mas utilizado para determinar simetría, es un número llamado coeficiente de Skewness, si el resultado es cercano a cero, el histograma es aproximadamente simétrico (Isaaks y Srivastava, 1989, citados por VERA, 2004).

Y esta definido por la siguiente ecuación:

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^n \left(X_i - \bar{X}_m \right)^3}{(n-1)S^3} \dots\dots\dots(2.5)$$

Donde, el numerador es el promedio al cubo de la diferencia entre los valores de los datos y su media, y el denominador es el cubo de la desviación estándar (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.4.2 Coeficiente de Kurtosis. Describe el grado de esbeltez de la distribución, tomado por lo general en relación con una distribución normal, y se puede calcular por:

$$\text{kurtosis} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^3}{(N-1)S^4} - 3 \dots\dots\dots(2.6)$$

Donde:

X_m : Media.

S: Desviación estándar.

n: Cantidad de datos.

Se define tres tipos de distribución según su grado de kurtosis:

La distribución normal tiene Kurtosis igual a 0, y es llamada mesokúrtica. A las distribuciones más agudas, con colas relativamente anchas, se les llama leptokúrticas, tienen valores de kurtosis mayores que 0, y las distribuciones más bien achatadas en el centro se llaman platikúrticas, tienen valores menores que 0 (GARCIA, 2003).

2.6 Análisis geoestadístico

La clasificación y estudio del suelo ha sido tradicionalmente el acercamiento más práctico para agrupar y separar diferentes suelos a una escala regional, pero en cambio, la variabilidad de las propiedades en sitios pequeños es bastante desconocida y a menudo es descrita por medios estadísticos clásicos (Trangmar *et al.*, 1985, citado por VERA, 2004).

La estadística clásica, asume que el promedio de la unidad muestreada es el valor esperado para todos los puntos en la unidad, y la varianza es un estimador del error dentro de la unidad. Esta aproximación, asume que la variabilidad sobre la media es aleatoria y no contiene referencias a la distribución geográfica de las diferencias dentro de la unidad muestreada. Diversos estudios, han mostrado que este aspecto aleatorio de la variabilidad del suelo, contiene un componente que es espacialmente dependiente (McBratney *et al.*, 1982; Yost *et al.*, 1982; Gajem *et al.*, 1981; Vieira *et al.*, 1981; Burgess y Webster, 1980; Cambell, 1978, Trangmar *et al.*, 1985, citados por DIAZ, 2006), esto implica, que dentro de un distancia o rango de dependencia espacial, las diferencias en las propiedades del suelo pueden ser descritas como una función de su separación espacial. Los métodos tradicionales de clasificación y análisis estadísticos no consideran directamente este aspecto (Trangmar *et al.*, 1985, citado por DIAZ, 2006).

La geoestadística, surge como la necesidad de aplicar las ideas estadísticas a problemas que involucran el conocimiento de distribuciones espaciales dentro de la ciencia del suelo (Folorunso *et al.*, 1994, citado por MARDONES, 2003).

2.6.1 Geoestadística

La geoestadística se define como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas, es decir las variables que presentan una estructura espacial de correlación, a la estimación de procesos o fenómenos espaciales. La descripción de la estructura espacial de una variable se realiza por medio de la función semivariograma (Liebhold *et al.*, 1991, citado por TANNURE *et al.*, 2004).

Otros autores definen la geoestadística como la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento de suelos y a la estimación de fenómenos naturales (Journel y Huijbregts, 1978, citados por QUINTÍN, 2003), o simplemente, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio (Chauvet, 1994, citado por QUINTÍN, 2003), siendo una herramienta útil en el estudio de estas variables (Zhang, 1992, citado por QUINTÍN, 2003) Su punto de partida es asumir una intuición topo-probabilista (Matheron, 1970, citado por QUINTÍN, 2003).

Los principios de la geoestadística toman en cuenta la dependencia espacial que existe entre observaciones separadas por una determinada distancia, mientras más cercanas estén las observaciones, ellas serán más similares. El grado de similitud disminuye con la distancia (Ovalle, 1991, citado por DIAZ, 2006).

2.6.2 Variables aleatorias regionalizadas

Según Journel y Huijbregts (1978), citados por QUINTIN (2003) plantean que la definición de variable regionalizada como una variable distribuida en el espacio es puramente descriptiva y envuelve una interpretación probabilística; refiriéndose a que, desde el punto de vista matemático una variable regionalizada es simplemente una función $f(x)$ que toma valores en todos los puntos x de coordenadas (x_i, y_i, z_i) en el espacio tridimensional. Sin embargo, es muy frecuente que estas funciones varíen tan irregularmente en el espacio que impide un estudio matemático directo, y se hace necesario realizar un análisis de variabilidad de la información disponible, sugiriendo un estudio profundo de la función variograma.

En términos teóricos es oportuno aclarar que una variable aleatoria, es una variable que puede tomar ciertos valores de acuerdo a cierta distribución de probabilidades. Un valor medido en cada punto x_i es considerado como una realización $z(x_i)$ de una variable aleatoria $Z(x_i)$ cuya media es $m(x_i)$. En los puntos x donde no

existen valores medidos, es desconocida la propiedad que se estudia, pero están bien definidos y pueden asimismo considerarse variables aleatorias $Z(x)$. Al conjunto de todas las mediciones $z(x)$ en el área de estudio de la variable regionalizada puede considerarse como una realización particular del conjunto de variables aleatorias ($Z(x)$, $x \in$ área de estudio). A este conjunto de variables aleatorias se llama Función Aleatoria y se escribe $Z(x)$ (Journel y Huijbregts, 1978; Armstrong y Carignan, 1997, citados por QUINTIN, 2003). De modo que al extender el concepto de función aleatoria al espacio de una o más dimensiones, aparece la noción aleatoria y estructural de una variable regionalizada: primero $Z(x)$ como variable aleatoria y segundo que las variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x+h)$ no son en general independientes, si no que están relacionadas por la estructura espacial de la variable regionalizada original $Z(x)$ (QUINTIN, 2003).

2.6.3 Hipótesis de la geoestadística

Como la forma en que se presenta la información es muy diversa (Journel y Huijbregts, 1978, citados por REGALADO *et al*, 2005), la geoestadística se construye asumiendo condiciones de Estacionaridad. Por lo que es necesario aceptar el cumplimiento de ciertas hipótesis sobre el carácter de la función aleatoria o procesos estocásticos estudiados, llamadas Hipótesis de la geoestadística. Estas son según Journel y Huijbregts (1978) y David (1977), citados por REGALADO *et al.*(2005). La Estacionaridad Estricta, la Estacionaridad de Segundo Orden, la Hipótesis Intrínseca.

2.6.3.1 Estacionaridad estricta o de primer orden. Se dice que $Z(x)$ es estrictamente estacionaria si la función de distribución de probabilidades de las variables aleatorias regionalizadas $Z(x_i)$ son iguales entre sí, independiente de la localización x_i , lo que requiere que los momentos de distinto orden para cada variable aleatoria regionalizada sean completamente independientes de la localización x_i . Esta condición como su nombre lo indica es demasiado restrictiva al estudiar la mayoría de los fenómenos encontrados en la práctica (REGALADO *et al.*, 2005).

2.6.3.2 Estacionaridad de segundo Orden. Se aplica si la covarianza espacial $C(h)$ de cada par $Z(x)$ y $Z(x+h)$ es la misma (independiente de la posición) por todos los lugares de la región en estudio y dependiente sobre h :

$$C(h) = E[Z(x) - m][Z(x+h) - m] \dots\dots\dots(2.7)$$

Mientras h se hace más grande, $C(h)$ decrece y la covarianza espacial decae (Trangmar, *et al.*, 1985, citado por VERA, 2004).

2.6.3.3 Hipótesis intrínseca. Una función aleatoria $Z(x)$ se dice intrínseca cuando:

a) Su esperanza matemática existe y no depende de la localización x_i .

$$E\{Z(x)\} = m \quad \forall x \dots\dots\dots(2.8)$$

b) Para todo vector h el incremento $[Z(x+h) - Z(x)]$ tiene varianza finita y no depende de la localización x_i :

$$\text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h) \quad \forall x \dots\dots\dots(2.9)$$

Cuando se cumple esta condición se dice que la función aleatoria $Z(x)$ es homogénea. Esta condición se encuentra con bastante frecuencia en la naturaleza, pues existen muchos procesos que no tiene varianza finita y sin embargo, poseen una función variograma finita (REGALADO *et al.*, 2005).

La estacionaridad de segundo orden, siempre implica la condición intrínseca (homogeneidad), sin embargo la relación inversa no siempre se cumple.

En la práctica según Armstrong y Carignan (1997) y Chica (1987) citados por REGALADO *et al.* (2005) son dos las hipótesis que más se presentan: La estacionaridad de segundo orden y la hipótesis intrínseca. Estas condiciones de estacionaridad se asumen en el desarrollo teórico, en la práctica deben ser verificadas

en los datos antes de comenzar un estudio geoestadístico, para lo que se puede realizar un análisis estadístico de la información, de modo que se refleje de así el grado de confiabilidad en la aplicación de estos métodos.

2.7 Análisis estructural

Los conceptos de variables regionalizadas y Estacionaridad proveen las bases teóricas para los análisis de dependencia usando autocorrelación o semivariograma (Trangmar, 1985, citado por VERA, 2004).

2.7.1 Semivarianza. La teoría de la variable regionalizada, asume que la semivarianza entre dos puntos cualesquiera dentro de la región de estudio solo dependerá de la distancia y la dirección de separación entre ellos y no de su localización geográfica (TRANGMAR *et al.*, 1985).

2.7.2 Covarianza y autocorrelación. La covarianza, determina la relación que existe entre dos variables de pares de observaciones y como se distribuyen espacialmente estas. Describe la dependencia que existe entre valores de $Z(x)$ con el cambio de distancia (Trangmar *et al.*, 1985, citado por DÍAZ, 2006).

La función de autocorrelación, expresa la correlación lineal entre una serie espacial y la misma serie a un intervalo de distancia más lejana. La definición asume, la estacionaridad de segundo orden, en el cual la autocorrelación es expresada como:

$$r(h) = C(h) / s^2 \dots\dots\dots(2.10)$$

donde:

$r(h)$ es la autocorrelación entres muestras en una distancia de separación, o retraso (h) (Trangmar *et al.*, 1985, citado por DÍAZ, 2006).

El autocorrelograma se puede observar en la Figura 2, el cual, es la relación entre los valores de autocorrelación $r(h)$ v/s el retraso (h).

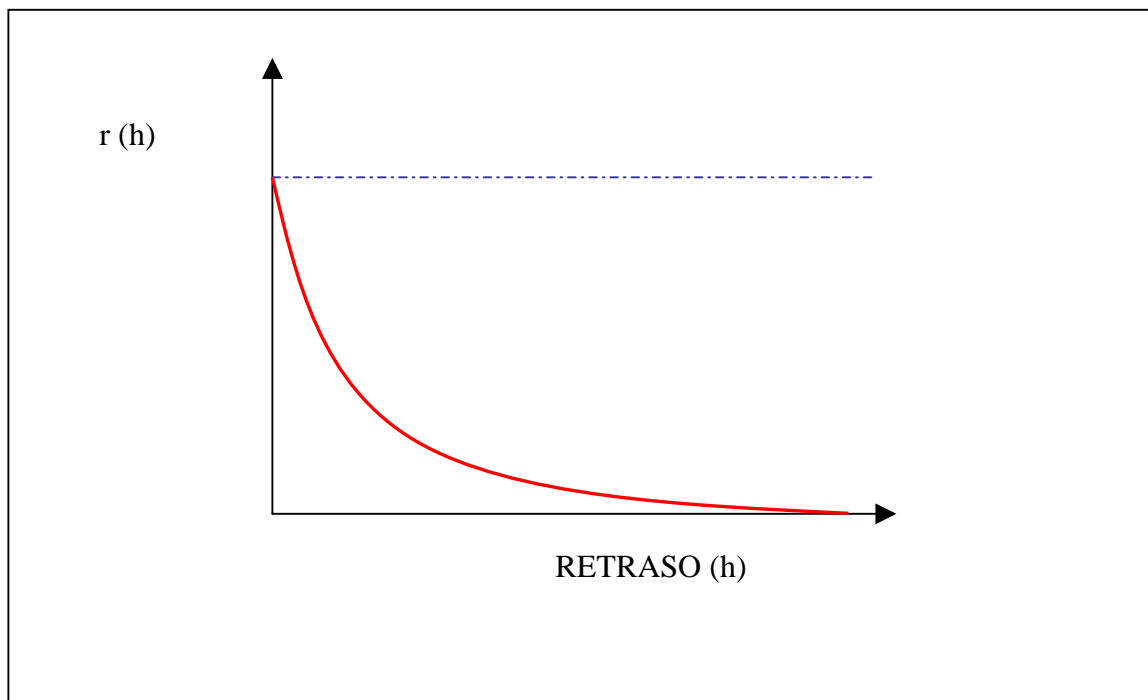


FIGURA 2: Autocorrelograma .

FUENTE: Adaptado de OLIVER y WEBSTER (2001)

Otro análisis de correlación es el llamado índice de Moran.

2.7.2.1 Índice de Moran. El índice de Moran es el procedimiento estadístico para calcular la dependencia espacial de una serie de datos o autocorrelación espacial. Es similar al índice de Geary, salvo que el de Moran utiliza los productos de los valores vecinos en vez de las diferencias (ANSELIN, 1995).

Un valor positivo de indica una concentración de valores similares (altos o bajos), mientras que un valor negativo indicaría una concentración geográfica de valores diferentes (ANSELIN, 1995).

2.7.3 Estudio variográfico

El análisis estructural o estudio variográfico según (Armstrong y Carignan, 1997, citados por QUINTIN, 2003) está compuesto por:

- El cálculo del semivariograma experimental.
- El ajuste a este de un modelo teórico conocido.

El cálculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado (Chica, 1987, citado por QUINTÍN, 2003), es decir, tener conocimiento de como la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobsom, 1995; Issaks & Co., 1999, citados por QUINTÍN, 2003).

El semivariograma es un índice de la variabilidad en el terreno y representa una curva construida en un plano de ejes cartesianos (Sánchez, 1998, citado por MARDONES, 2003).

Este análisis tiene como condicionantes: la distribución estadística, la existencia de valores aberrantes o anómalos, la presencia de zonas homogéneas o posibles zonaciones en la distribución de las leyes (Sánchez, 1998, citado por MARDONES, 2003).

Puede ser calculado inicialmente el semivariograma medio, global u “omnidireccional” proporcionando una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar u obtener una estructura clara y definida. Posteriormente deben ser calculados los semivariogramas en diferentes direcciones, puede ser calculado en 4 direcciones separadas 45° con tolerancia angular de 22.5° , comenzando por 0° (Figura 3-a) hasta encontrar la dirección de máxima o mínima variabilidad (Figura 3-b), pueden ser calculados también, más específicamente, en 8 direcciones separadas por 22.5° . Una forma rápida y práctica de visualizar la existencia de anisotropía es mediante el cálculo del “Mapa de Variogramas” (Frykman y Rogon,

1993; Homand-Etienne *et al.*, 1995; Isaaks & Co., 1999, citados por QUINTIN, 2003), el cual además permitirá obtener la dirección inicial aproximada para el cálculo de los semivariogramas direccionales, permitiendo un análisis adecuado de anisotropía. Posteriormente, dependiendo de la continuidad espacial, es suficiente sólo calcular dos semivariogramas separados 90° (QUINTIN, 2003).

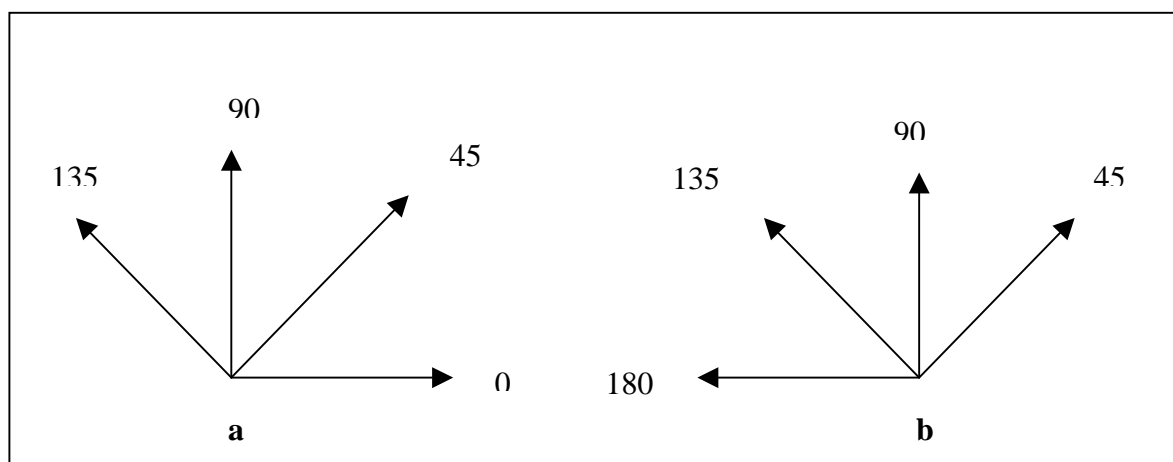


FIGURA 3: Gráfico de direcciones para cálculo de los semivariogramas, a- comenzando en 0, b- comenzando en 45° .

FUENTE: MATHERON (1969).

Ahora, el semivariograma experimental obtenido no es utilizado en el proceso de estimación, debe ser ajustado a éste uno a varios modelos teóricos, obteniéndose un modelo o función analítica que caracteriza la continuidad espacial de la variable estudiada. Los modelos de variograma teórico utilizado en el proceso de estimación o simulación deben satisfacer ciertas condiciones, es decir tienen que ser “definido positivo” o de “tipo positivo” (Deutsch, 1994; Myers, 1992; Cressie y Grondona, 1992, citados por QUINTIN, 2003) de lo contrario puede existir el riesgo de encontrar varianzas negativas que no tienen sentido (Armstrong y Carignan, 1997, citados por QUINTIN, 2003). En general el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza de forma visual. En ocasiones se efectúan ajustes polinomiales por el método de los mínimos cuadrados u otras variantes, que aunque se encuentra el mejor ajuste, no siempre se verifica la condición de que el variograma obtenido sea siempre de tipo positivo, siendo insatisfactorio (Genton, 1998

citado por QUINTIN, 2003), por lo que se recomienda el uso de modelos autorizados. Finalmente debe obtenerse uno o varios modelos de variogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance. El modelo de variograma seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental (Wackernagel, 1995, citado por QUINTIN, 2003), que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

2.7.3.1 Tipos de semivariograma. Existen dos tipos (JAMARAL, 2002).

- Semivariograma transicionales. La semivarianza aumenta al ir aumentando el espaciamiento entre las muestras, hasta un cierto valor de distancia, a partir de la cual, la semivarianza se estabiliza. La distancia la cual se estabiliza es el rango (JAMARAL, 2002).
- Semivariograma no transicionales. La semivarianza crece monótonamente al ir aumentando la distancia de muestreo, sin estabilizar su valor dentro de la mayor distancia de espaciamiento entre las muestras analizadas. En estos no puede definirse un rango ya que este, si existe, esta fuera de la máxima longitud del área muestreada (JAMARAL, 2002).

2.7.4 Parámetros del semivariograma

Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (existencia de efecto de pepita), el valor máximo de variabilidad (meseta), y el área de influencia de la correlación (alcance) (QUINTIN, 2003).

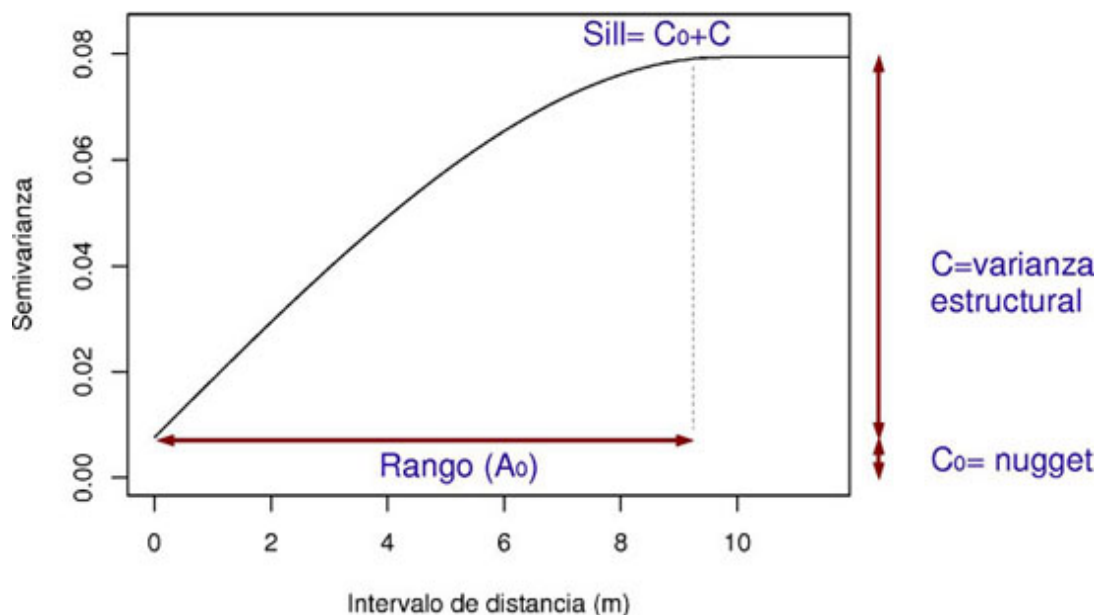


FIGURA 4: Variograma típico.

FUENTE: Gallardo (2004).

2.7.4.1 Efecto Pepita (Nugget). El semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto de pepita, en inglés (Nugget effect). Puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extender ésta hasta que se intercepte con el eje Y. Si esta intersección ocurre por debajo de cero, el valor asumido por este efecto es cero, pues valores negativos de $\gamma(0)$ no tienen significado y no es común. El efecto pepita se representa como C_0 (QUINTIN, 2003).

2.7.4.2 Meseta (Sill). Es el valor de $\gamma(h)$ para el cual con el aumento de h su valor permanece constante, se representa como $(C_T = C + C_0)$ y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada (QUINTIN, 2003).

2.7.4.3 Alcance o umbral (Range). La distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes, se denomina alcance y se representa por (a) , es decir, las distancias para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta (QUINTIN, 2003).

2.7.5 Modelos teóricos de semivariogramas

2.7.5.1 Modelo Esférico. Este modelo es probablemente el más utilizado, es una expresión polinomial simple (Gamma desing software, 2004; Trangmar *et al.*, 1985, citados por DIAZ, 2006).

2.7.5.2 Modelo Exponencial. Este modelo a diferencia del esférico crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica (Gamma desing software, 2004; Trangmar *et al.*, 1985, citados por DIAZ, 2006).

2.7.5.3 Modelo Gaussiano. Este es un modelo extremadamente continuo. Inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo Exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica (Gamma desing software, 2004; Trangmar *et al.*, 1985, citados por DIAZ, 2006).

2.7.5.4 Modelo Lineal. El modelo lineal describe un variograma de línea recta. En este modelo, el umbral no existe y el rango es definido arbitrariamente como la distancia a la cual el modelo cruza la varianza (Gamma desing software, 2004; Trangmar *et al.*, 1985, citado por DIAZ, 2006).

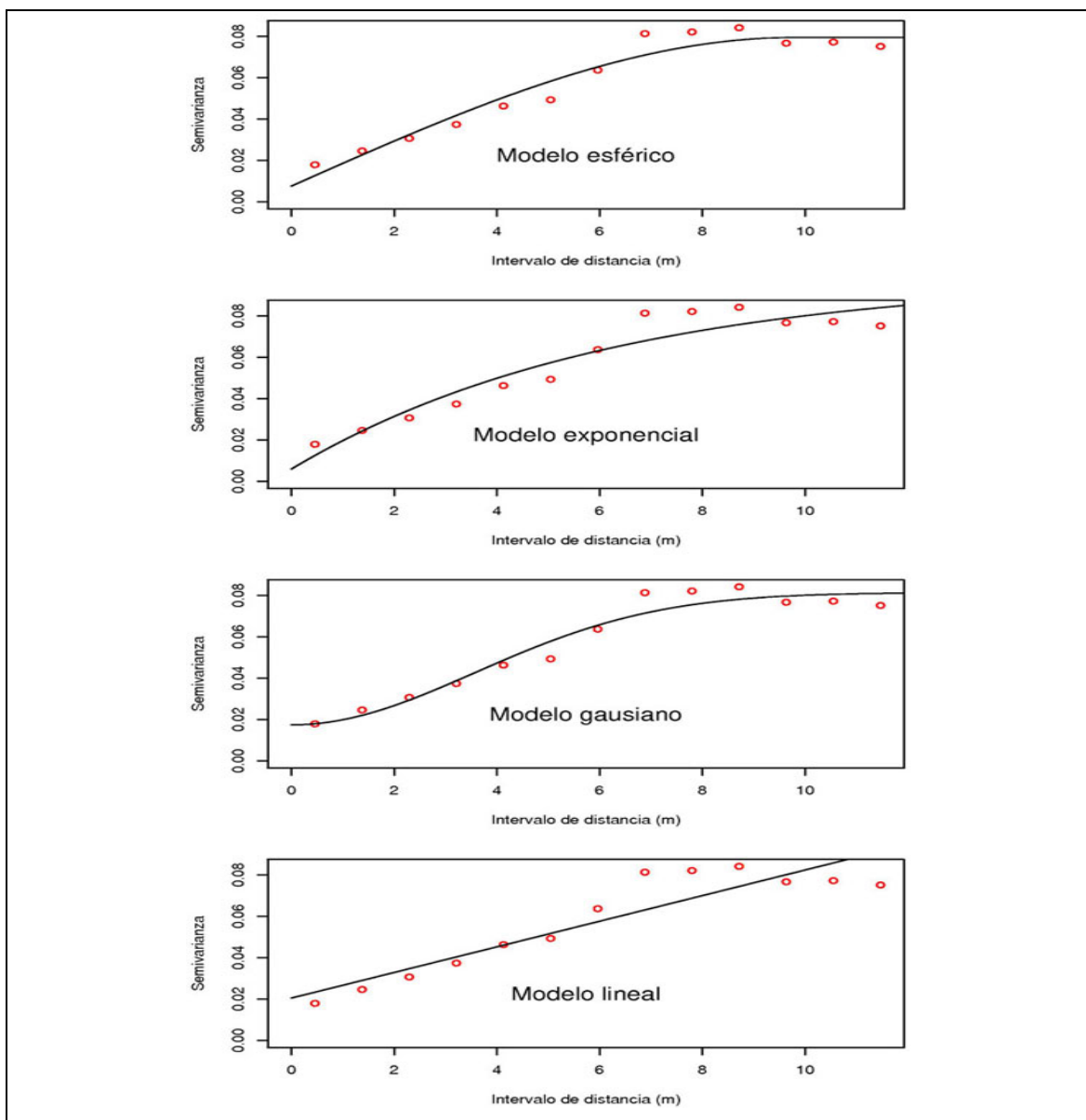


FIGURA 5: Semivariogramas experimentales y modelos de Semivarianza.

FUENTE: Gallardo (2004).

2.8 Isotropía y Anisotropía

Se conoce que el semivariograma describe las características de continuidad espacial de la variable regionalizada en una dirección, pero este comportamiento puede variar según la dirección que se analice (Journel y Huijbregts (1978), David (1977), Zimmerman (1993), Krajewski y Gibbs (1993), citados por QUINTIN, 2003).

Cuando el semivariograma calculado en diferentes direcciones (norte-sur, este-oeste, y en direcciones intermedias de 45° o de 22.5° , con tolerancia de 22.5°), muestra similar comportamiento, se dice que el fenómeno es isotrópico, cuando muestran diferentes comportamientos es anisotrópico (Krajewski y Gibbs, 1993, citados por QUINTIN, 2003). Los tipos de anisotropías más comunes son la Geométrica y la Zonal (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; Armstrong y Carignan, 1997, citados por QUINTIN, 2003).

2.8.1 Tipos de anisotropía

2.8.1.1 Anisotropía Geométrica Está presente cuando los semivariogramas en diferentes direcciones tiene la misma meseta pero distintos alcance o umbral (QUINTIN, 2003).

Esto indica, que la gradiente de variación cambia con la dirección, pero la variabilidad es la misma. Esto caracteriza una zona elipsoidal de influencia que se alarga en la dirección de mínima variación. La dirección de máxima variación ocurre perpendicular a la dirección de mínima variación (Sánchez, 1998, citado por MARDONES, 2003).

2.8.1.2 Anisotropía Zonal. Está presente cuando los semivariogramas en diferentes direcciones tienen diferentes mesetas y alcances o umbral (QUINTIN, 2003).

Esto quiere decir, que la variación es diferente de acuerdo a la dirección pero la extensión espacial es igual. Esto da como resultado diferentes umbrales (alcances) o diferentes formas de semivariograma, calculados para la misma propiedad en diferentes direcciones. Generalmente, la anisotropía zonal pura, es difícil de encontrar, dándose más comúnmente, una mezcla entre anisotropías zonales y geométricas (Trangmar *et al.*, Van Meirvenne, 1997, Mardones, 2003, citados por DIAZ, 2006).

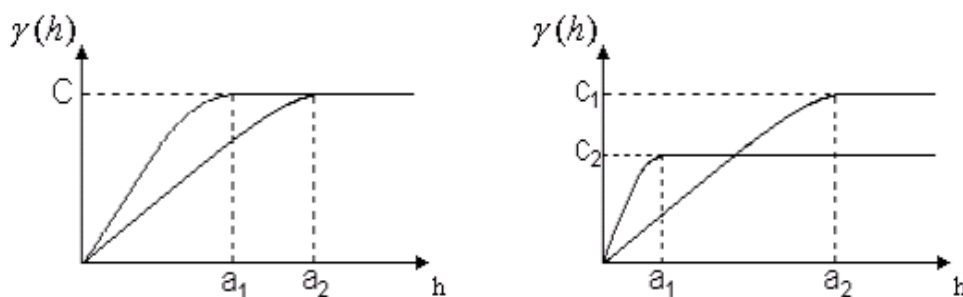


FIGURA 6: Tipos de Anisotropía. 6a- Anisotropía geométrica, 6b- Anisotropía zonal.

FUENTE: MATHERON (1969).

2.9 El kriging

La estimación geoestadística trata de obtener la versión “más probable” de la realidad. Existe gran diversidad de métodos geoestadísticos de estimación, todos ellos reciben el mismo nombre básico de kriging, en honor a del Prof. D.G. Krige, geólogo sudafricano, a quien se considera como el precursor del método, mas un apelativo para particularizar a cada uno de ellos, por ejemplo kriging puntual, kriging por bloques, etc. (Ibáñez y Machado, 1995, citados por TANNURE, 2004).

El kriging consiste en encontrar la mejor estimación lineal posible de la ley de un panel, considerando la información disponible, es decir las leyes de las diferentes muestras que se han tomado, sea al interior, sea al exterior del panel que se quiere estimar (MATHERON, 1969).

El kriging consiste en efectuar una ponderación, es decir atribuir un peso a la ley de cada muestra, estos pesos se calculan de manera de hacer mínima la varianza de estimación resultante, considerando las características geométricas del problema (formas, dimensiones e implantación relativa del panel y de la muestras) (MATHERON, 1969).

2.9.1 Estimación del kriging

La mayoría de las propiedades ambientales pueden ser medidas en un número infinito de lugares, pero en la práctica ellas son medidas solo en algunos pocos, esto mayormente por razones económicas. Para saber estos valores no muestreados, se debe hacer una estimación a partir de los datos obtenidos, y de esta forma conseguir datos de áreas en las cuales las propiedades no pueden ser medidas o no son observables directamente (WEBSTER y OLIVER, 2001).

El kriging es una técnica de estimación que proporciona el mejor estimador lineal imparcial), (Schaug *et al.*, 1993, Christensen *et al.*, 1993 y Abasov *et al.*, 1990, citados por QUINTIN, 2003), y que además proporciona un error de estimación conocido como varianza de krigeaje que depende del modelo de variograma obtenido y de las localizaciones de los datos originales (Armstrong y Carignan, 1997; Journel y Huijbregts, 1978, David, 1977 y Abasov *et al.*, 1990, citados por QUINTIN, 2003). Esto brinda la posibilidad de hacer análisis sobre la calidad de las estimaciones (Weerts y Bierkens, 1993; Haas, 1992, citados por QUINTIN, 2003).

El objetivo básico del kriging, es la estimación de $Z(x)$, valor de la función aleatoria Z en el punto X , partiendo del conocimiento del conjunto de datos experimentales y de la función que caracteriza la variabilidad espacial del fenómeno, la función variograma (Ibañez y Machado, 1995, citados por TANNURE, 2004).

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Materiales

Para el estudio se utilizó un suelo Andisol, serie Pelchuquín, la cual, se encuentra ubicada en la provincia de Valdivia, específicamente en las localidades de San José de la Mariquina y Máfil. Sus coordenadas geográficas son 39°32`-39°42` norte y 73°58`- 73°0` este. En el Cuadro 1 en donde se presentan las características químicas de la serie definidas en su perfil modal.

CUADRO 1. Características químicas y físicas de los suelos de la serie Pelchuquín.

Profundidad (cm)	0-15	15-33	33-52	52-71
pH 1:2,5 (agua)	5.50	6.30	6.10	6.00
% C (Walkey y Black)	10.71	5.44	1.11	1.75
% materia orgánica	18.50	9.40	1.90	3.00
% de saturación de bases	8.62	6.20	8.60	9.50
Relación C/N	15.1:1	14.3:1	4.8:1	7.6:1
Al extractable (ppm)	616.0	594.5	622.5	668.0
Fe extractable (ppm)	29.50	37.00	41.00	46.80
Capacidad de fijación de P (%)	51.56	75.20	80.11	93.60

FUENTE: Kühne y Nissen (1973), adaptado por IREN-UACH (1978).

3.1.1 Instrumentos de muestreo en terreno. Para el sistema de toma de muestra se utilizaron los siguientes elementos:

Un mapa de la serie Pelchuquín del Instituto Geográfico Militar, en donde se delimitó la zona a muestrear, un GPS (sistema de posicionamiento global), con el cual

se tomaron las coordenadas geográficas de cada punto, además de implementos para la toma de la muestra, por ejemplo, pala, cuchillo y bolsas plásticas, estas últimas fueron etiquetadas con los datos de importancia (profundidad, nº de la muestra).

3.1.2 Materiales utilizados en laboratorio

3.1.2.1 Periodo de secado de muestra. Se utilizó tamiz de 2mm, 338 bolsas plásticas, marcador, papel de diario.

3.1.2.2 Proceso de incubación. 338 bolsas, las muestras fueron tratadas con fosfato de potasio, incubadas 24 horas con temperatura de 20°C.

3.1.2.3 Etapa de análisis químicos (P- Olsen y Capacidad tampón). Se utilizaron balanza analítica, frascos ámbar, frascos plásticos, matraces de 50 y 100 ml, frascos precipitados, pipetas volumétricas, probetas, espátulas, agitador orbital, embudos, porta embudos, filtro de papel Whatman Nº 1, pH metro, espectrofotómetro UV.

3.1.2.4 Reactivos. Los reactivos utilizados fueron los siguientes:

- Solución estándar de P de 1500 ppm de P.
- Solución extractiva de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) 0,5 M a pH 8,5.
- Carbón activado libre de P.
- Solución A (compuesta por molibdato de amonio, tartrato de antimonio y potasio, ácido sulfúrico concentrado).
- Solución B (solución A + ácido ascórbico).

3.1.2.5 Lectura de muestras. Se utilizó un espectrofotómetro UV- visible GBC 919.

3.1.3 Programas computacionales

- Programa Excel v7.0 (Microsoft ®).
- Programa Geoestadístico GS+Plus v7.0 (Gamma Desing Software).

- Programa para elaboración de mapas de contorno y superficie Surfer v 8.0 (Golden Software).

3.2 Método

3.2.1 Método de toma de muestra

Los métodos de muestreo para identificar variaciones espaciales, va desde la interpretación de imágenes satelitales hasta muestreo de grilla o dirigidos según tipos de suelo mapeados en lote o según áreas consideradas relativamente homogéneas en términos de relieve o de manejos anteriores. En este punto es importante considerar que el tamaño de área a identificar como distinta y generadora de variables debe ser de tal magnitud que permita el manejo diferencial de las aplicaciones diagnosticadas (manejo por sitio específico) y no resulte en una información anecdótica (DIAZ-ZORITA, 1999).

3.2.2 Sector de toma de muestra

De la serie Pelchuquín, 150 puntos ya se encontraban previamente muestreados y analizados (Aluminio extractable) por Vera (2004). Luego fueron extraídos 50 puntos más, los cuales fueron tomadas desde San José, hasta el fuerte San Luis de Alba (sector que no fue considerado en la toma de muestra anterior), realizándose un muestreo retículo irregular, lo que implica obtener las muestras lo largo de los caminos repitiéndolos a distancia lo más homogénea posible. Cada punto fue tomado con su respectiva coordenada (UTM).

Las muestras fueron separadas en dos profundidades la primera de 0-10 cm y la segunda de 10-20 cm. Fueron tomadas con pala y georreferenciadas.

De las 400 muestras tomadas, se debió dejar fuera del análisis algunas, por problema ocasionados en el transporte. Por lo que este estudio se ejecuto con 169 puntos (338 muestras), los cuales fueron secados y tamizados en la sala de secado y

su análisis se realizó en el Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, de la Universidad Austral de Chile.

3.2.3 Análisis químico para la determinación de capacidad de retención de fósforo. Este método consta de dos partes. La primera, la determinación fósforo disponible, con la metodología de extracción con solución de bicarbonato de sodio 0.5 mol/L a pH 8.5 y determinación de colorimetría de azul molibdeno (SADZAWKA *et al.*, 2004).

Este método se usa como índice del fósforo disponible en suelos y se conoce como "P-Olsen". La utilidad del extractante se basa en que la solución de bicarbonato de sodio reduce la concentración de los iones calcio, aluminio y hierro(III) por precipitación de carbonato de calcio e hidróxidos de aluminio y hierro (III) y libera así iones fosfato a la solución (SADZAWKA *et al.*, 2004).

La segunda etapa consiste en la incubación de las muestras (analizadas anteriormente con el método de P-Olsen), para la determinación de la capacidad tampón de fósforo (CP), la cual consta de la incubación de un volumen de suelo con fósforo a 20° C por 24 horas (SADZAWKA *et al.*, 2004).

Para el análisis que se requiere de adsorción de fósforo, es necesario calcular lo que retienen de fósforo en el suelo, por tanto calcularemos $(1-C_p)$.

3.2.4 Análisis estadístico. Se realizó un análisis estadístico tradicional y otro geoestadístico. Para la realización de estos análisis, los datos fueron ordenados en forma ascendente (de Sur a Norte) de acuerdo a sus coordenadas geográficas, en una planilla electrónica del programa Excel, donde los datos fueron luego exportados a una planilla del programa Gs+ Plus.

3.2.4.1 Análisis estadístico tradicional. El conjunto de los datos fueron sometidos a un análisis estadístico univariado, en el cual, se calcularon estadísticos básicos como por ejemplo, media, desviación estándar, valores máximos y mínimos, coeficiente de

variación para cada profundidad. Se determinó también, la normalidad de los datos, mediante los coeficientes de Skewness (simetría) y kurtosis (agudeza).

3.2.4.2 Análisis geoestadístico. Para este análisis, se utilizó el programa GS+.plus versión 7.0. La base de datos disponible, consta de las coordenadas (Norte- Este) de los 169 puntos muestreados y sus correspondientes concentraciones de fósforo retenido (mg/kg/mg/kg), para la profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm.

Según MORAI (2003), todo trabajo geoestadístico tiene que llevarse a cabo en tres etapas:

- 1) Análisis exploratorio de los datos. Estudiados los datos muestrales, sin tener en cuenta su distribución geográfica (MORAI, 2003), Lo cual, se realiza a través del análisis estadístico tradicional, anteriormente mencionados.
- 2) Análisis estructural. Estudio de la continuidad espacial de la variable (MORAI, 2003). Para la descripción de la estructura de correlación espacial de los datos, se utilizó el semivariograma y correlograma. Este último solo con el fin de verificar los resultados obtenidos en el análisis de Semivarianza.
Una vez definido los puntos del semivariograma experimental se procedió a ajustar un modelo a dichos puntos, denominado semivariograma teórico, lo anterior debido a la imposibilidad de trabajar con un semivariograma experimental, carente de una función matemática precisa.
- 3) Predicciones. Estimaciones de la variable en los puntos no muestreados, considerando la estructura espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestreados, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas (MORAI, 2003). Realizando el análisis de superficie como se detalla en el siguiente punto.

3.2.5 Análisis de superficie. Este análisis se realizó con la ayuda del programa Surfer versión 8.0, con el fin de diseñar un mapa de contorno, para así poder apreciar de mejor forma la distribución de las concentraciones de fósforo retenido, dentro de la

zona estudiada. Para esto se ocupó el método de interpolación kriging puntual, utilizando los parámetros obtenidos del análisis de semivariograma, tales como, modelo, varianza nugget, rango de dependencia espacial y semivarianza estructural.

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico tradicional

En el análisis estadístico tradicional, se determino los siguientes parámetros que servirán para el estudio. Estos parámetros son: desviación estándar, promedio, valores máximos y mínimos, coeficiente de variación, coeficiente de Skewness o simetría y kurtosis.

4.1.1 Estadígrafos generales. A continuación se presenta los valores promedios de ambas profundidades, como también los valores máximos, mínimos varianza, desviación estándar y los coeficientes de kurtosis y skewness o simetría.

CUADRO 2. Resumen de estadígrafos generales de la variable en estudio

Estadígrafos generales	0-10 cm	10-20 cm
Promedio (mg/kg/mg/kg)	0.64	0.70
Valor mínimo (mg/kg/mg/kg)	0.20	0.20
Valor máximo (mg/kg/mg/kg)	0.80	0.90
Varianza	0.011	0.0118
Desviación estándar	0.10	0.11
Coeficiente de variación (%)	16.3	15.4
Coeficiente de kurtosis	0.84 (0.37)	4.35 (0.37)
Coeficiente de Skewness	-0.68 (0.19)	-1.61 (0.19)

4.1.1.1 Promedio, valores máximos y mínimos. En el Cuadro 2, aparecen los estadígrafos generales de las variables estudiadas, se puede observar que los valores de los promedios son mayores a medida que aumenta la profundidad, es decir, existe mayor capacidad de retención de fósforo adsorbido en la capa sub-superficial, esto se puede deber, a que existen variables en la superficie del suelo (pH, materia orgánica) que afectan la adsorción o mejoran la disponibilidad del fósforo en el suelo. Se sabe

que a mayor profundidad disminuye la materia orgánica y se produce un aumento relativo de los materiales amorfos, lo que permite que se fije más fósforo en profundidad.

En el estudio realizado por IREN-UACH (1978), los valores encontrados para fijación de fósforo en la serie Pelchuquín, fue de 51%, a una profundidad de 15 cm y de 75% para la profundidad de 15- 30 cm. Se puede observar que los valores obtenidos en este trabajo, son mayores a los determinados en el estudio de IREN-UACH (1978), en la superficie del suelo, el valor promedio fue de 64% alcanzando valores cercanos al 64% (0-10 cm) y en profundidad se encontraron valores cercanos a lo expuesto en el estudio de IREN- UACH, de 70% (10-20 cm).

En el caso de los valores de máximo y mínimo, se puede estimar que los rangos entre los valores son amplios (0.2 a 0.8 para (0-10 cm) y 0.2 a 0.9 para (10-20 cm), aunque dejando claro que los valores extremos de ambas profundidades, no son los que se repiten con mayor frecuencia en los datos analizados.

En los Anexos 1 y 2, se presenta la tabla en la cual se muestran en detalle, para cada punto recogido, los valores de adsorción de fósforo.

4.1.1.2 Varianza y Desviación estándar. Cuadro 2 presenta los valores de varianza y desviación estándar para las muestras analizadas. Con estos valores se puede determinar la variabilidad de los datos analizados en este trabajo.

La varianza, como medida de dispersión, nos muestra la distancia existente entre los valores de la serie y la media.

Se determinó que las desviaciones estándar de ambas profundidades son muy similares, existiendo una casi imperceptible diferencia entre una y otra.

Los valores bajos en desviación estándar indican, baja variabilidad de los datos, esto se puede contraponer con lo expuesto en el rango de los valores de máximo y mínimo (Cuadro 2), pero la respuesta a esto, es que el rango obtenido se calcula con

todos los datos, no obstante, la moda de los datos se encontraba en los valores centrales.

4.1.1.3 Coeficiente de variación. En el caso del coeficiente de variación se obtuvo en las dos profundidades los siguientes resultados.

En el Cuadro 2, se determinó el coeficiente de variación, para las profundidades de 0-10 cm y 10 -20 cm, se puede observar que los valores encontrados en ambas profundidades son muy similares y bajos, lo que explica la baja variabilidad de los datos.

4.1.1.4 Coeficientes de skewness o simetría y kurtosis. Estos parámetros fueron obtenidos a través del análisis estadístico tradicional, los cuales nos determinaron los siguientes resultados.

El coeficiente de kurtosis analiza el grado de concentración que presentan los valores alrededor de la zona central de la distribución (ESCRIBANO y GONZALES, 2003).

Se definen tres tipos de distribuciones, según el grado de kurtosis: distribución Mesocurtica, distribución Leptocurtica y distribución Platicurtica (GARCIA, 2003). Se puede observar que el coeficiente de kurtosis muestra una tendencia a la distribución mayor a cero, en ambas profundidades, por lo que se considera como leptocurtica, es decir, presenta distribución aguda de los datos, con cola relativamente ancha.

Para el coeficiente de skewness o de simetría, se puede determinar con respecto a los siguientes parámetros. Si el coeficiente de skewness es igual a cero, en este caso se dice que la distribución es simétrica, es decir existe la misma concentración de valores a la derecha y a la izquierda de la media. En el caso, el cual, el coeficiente es menor a cero, en ese caso se dice que la distribución es asimétrica negativa, es decir los datos están con disposición más preponderante hacia la izquierda de la media. Si existe el caso que el valor del coeficiente sea mayor a cero,

en ese caso se habla de que existe una distribución asimétrica positiva, esto quiere decir que los valores, producen que la forma de la curva se incline hacia la derecha de la media (ESCRIBANO y GONZALES, 2003).

En el caso de los valores obtenidos en el coeficiente de skewness o de simetría, en ambas profundidades, se reconoce una distribución asimétrica negativa.

Sin embargo, según Sanches (1998), Mardones (2003), citados por VERA (2004), para ambos coeficientes (Skewness y kurtosis) se acepta un valor de ± 2 para considerar una distribución dentro de lo normal.

Por lo tanto, aunque se encuentra con una inclinación a valores que se encuentran a la izquierda de la media, los valores se acomodan a los que se acepta teóricamente, para considerarse una distribución normal.

Un requisito importante para la obtención de semivariogramas experimentales, es que se tenga una distribución cercana a la curva normal, debido a que estos son sensitivos a la simetría de las distribuciones (Myers, 1991, citado por PONCE *et al.*, 1999). En este caso se obtuvo una curva cercana a la normalidad, por tanto, es posible realizar el trabajo geoestadístico necesario para la determinación de variabilidad y dependencia espacial.

4.1.1.5 Histograma de frecuencia. Se sabe que los histogramas resumen los datos disponibles de una población, de forma que se puede analizar de una manera más sistemática y resumida. Para que las características de la población sean más esclarecedoras, se presenta el gráfico o histograma de frecuencia.

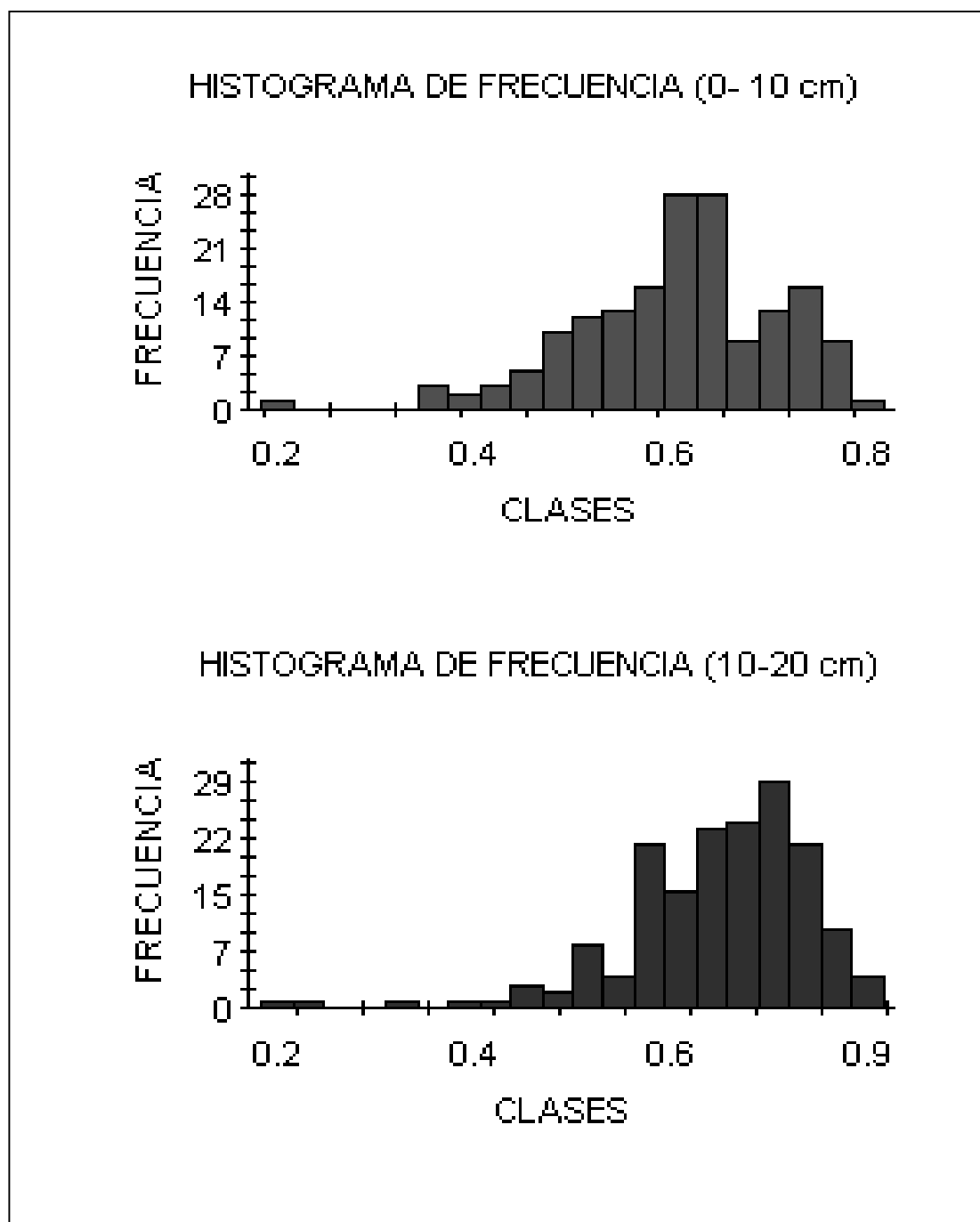


FIGURA 7: Histograma de frecuencia para retención de fósforo a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm.

Como se puede observar en la Figura 7, se encuentran los histogramas de frecuencia de ambas profundidades, los cuales muestran características de los datos analizados, y como se explicó anteriormente, se observa más gráficamente la forma de la curva de normalidad, en la cual, se aprecia que ambas son puntiagudas y con cola larga.

4.2 Análisis geoestadístico. Se evaluó los semivariogramas y se ajustaron gráficamente, con lo cual, se obtuvo los siguientes resultados.

Para la fabricación del semivariograma, se calcula la distancia activa de retraso (DRA), el que presenta la distancia en la cual se analizaron los datos. En este caso la distancia activa de retraso alcanza valores de 12.413 m para ambas profundidades, que es la máxima distancia que incluye los datos utilizados para la fabricación del semivariograma.

4.2.1 Semivariogramas. Los resultados obtenidos en la determinación del semivariograma se muestran a continuación, en el cuadro 6, en el cual se observan distintos parámetros.

CUADRO 3. Parámetros geoestadísticos utilizados para el estudio de variabilidad y dependencia espacial, para análisis de adsorción de fósforo.

Parámetros geoestadísticos	Profundidad (cm)	
	0-10 cm	10-20 cm
Modelo de ajuste	Esférico	Exponencial
Distancia activa de retraso (m)	12413.8	12413.8
Nugget (Co)	0.004700	0.001030
Sill (Co + C)	0.011500	0.011160
Rango (A) (m)	3810.000	630.000
Proporción (C ₀ /C ₀ +C) (%)	40.8	9.2
Coefficiente de determinación (r ²) (%)	79	23

En el Cuadro 3, se puede apreciar diversos parámetros usados habitualmente en el análisis geoestadístico.

Para la primera profundidad se obtuvo un valor de r^2 de 0.79, lo que indica que el modelo ajustado presenta una correlación de los datos del 79%. En la segunda profundidad (10-20 cm) encontramos un valor de r^2 mucho menor al anterior, solo alcanzando un valor de 23% (0.23) de correlación.

4.2.1.1 Modelo. El semivariograma para las dos profundidades es isotrópico, esto quiere decir, que la concentración de fósforo retenido en el suelo, depende únicamente de la distancia de separación entre las muestras tomadas en terreno.

En el caso de la primera profundidad (0-10 cm) el modelo que mejor se ajusta es el esférico, para la profundidad de (10-20 cm) el modelo que mejor se ajusta es el exponencial (Figura 8). En ambos casos, los semivariogramas presentaron un comportamiento transicional, donde la semivarianza, aumenta a medida que aumenta el espaciamiento de las muestras, hasta alcanzar un valor en el cual se estabiliza (rango), en este valor se encuentra el límite hasta donde existe dependencia espacial.

El análisis realizado por Vera (2004), determinó que para la misma serie, pero tomando como parámetro de estudio el aluminio extractable, concluyó que el modelo de semivariograma era isotrópico (modelo ajustado lineal con comportamiento no transicional). Presentando variogramas similares para ambas profundidades, con lo que se determinó que existía continuidad espacial en profundidad. En el caso del análisis con fósforo retenido, los semivariogramas no presentan esta similitud en forma clara, por lo tanto no se puede determinar que existe continuidad espacial en profundidad.

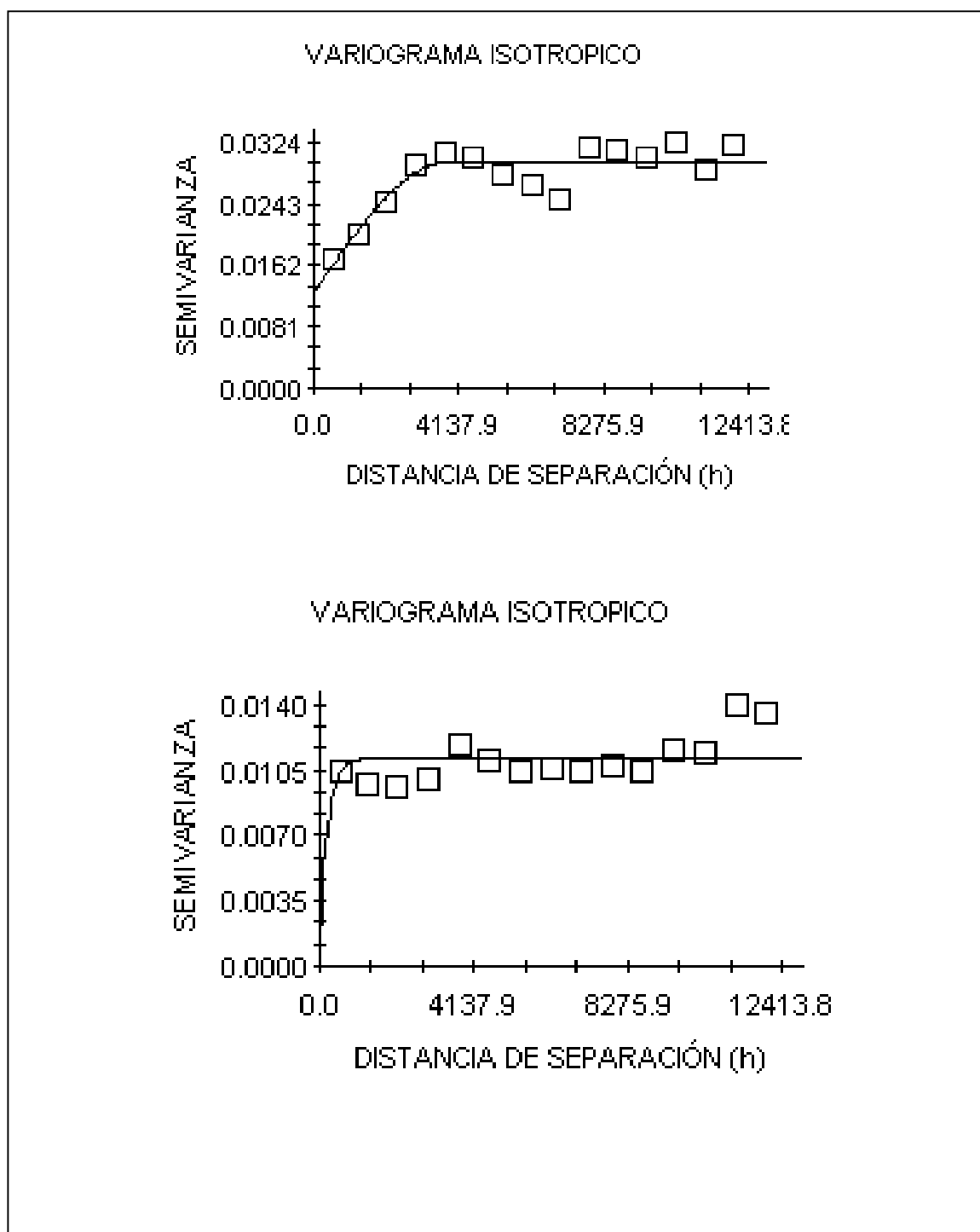


FIGURA 8: Semivariograma ajustados de retención de fósforo a la profundidad d 0-10 cm y 10-20 cm.

4.2.1.2 Efecto Pepita (Nugget). El efecto nugget es útil para tener una idea de la importancia que tiene la variabilidad aleatoria en la variabilidad de la propiedad analizada, representando discontinuidad del semivariograma producida por variaciones a una escala menor que la distancia de muestreo, en este caso, el nugget es bastante bajo en ambas profundidades, es decir, la variabilidad aleatoria no es de gran importancia para la variabilidad analizada.

4.2.1.3 Rango de dependencia espacial. El rango determina la distancia dentro de la cual los valores de la variable estudiada poseen asociación espacial, a partir de este valor se puede considerar que la variable deja de tener asociación espacial (GAMMA DESING SOFTWARE, 1998).

Para las muestras analizadas, se obtuvo los siguientes resultados con respecto al rango de dependencia espacial (A). Se concluyó que para la profundidad de 0-10 cm se encontró un rango de 3810 m y para la profundidad de 10-20 cm se encontró un rango de 630 m lo cual es mucho menor que la distancia activa de retraso (12413.8 m), esto quiere decir que la dependencia espacial de la fijación de fósforo no sobrepasa los límites de la distancia tomada para los cálculos del semivariograma.

Cambardella *et al.* (1994), Sainato *et al.* (1996) citados por VERA (2004), señalan, que al expresar la Semivarianza de nugget (Co) como un porcentaje del valor del Sill ($Co + C$) se puede hacer una comparación del tamaño relativo del efecto nugget en las propiedades del suelo: Si la razón es de 25%, la variable se considera fuertemente dependiente; si este coeficiente está entre 25% y 75% la variable es moderadamente dependiente y si la razón es mayor que 75% se considera débilmente dependiente.

Si se relaciona lo anterior con los datos, se puede observar que, la relación entre efecto pepita / meseta que es un parámetro importante por que da idea del grado de dependencia espacial. En el cuadro 3 se puede ver que la proporción, en el caso, de la profundidad de 0-10 cm es de un 40.8%, lo que se considera una variable moderadamente dependiente. Para la profundidad de (10-20 cm), se observa una alta dependencia espacial llegando a un valor de 9.2%.

4.2.1.4 Análisis de anisotropía. Se realizó un análisis de anisotropía, con el fin, de detectar posibles tendencias de los datos en una determinada dirección. Se realizó la variografía en diferentes direcciones rotando los ángulos de búsqueda, no encontrando tendencia clara hacia ninguna dirección en particular. Aunque en la profundidad 10-20 cm se encontró que en el análisis anisotrópico una mejor correlación. Sin embargo, no se pudo decidir por una dirección clara, ya que se evidenció, que se conseguían igual r^2 y proporción hacia varias direcciones distintas. Los resultados obtenidos en este análisis se muestran en el Anexos 3 y 4.

4.2.2 Correlogramas. El análisis de autocorrelación, es otro de los análisis que se puede realizar en el programa Gamma Desing Software, el cual se realiza a través del índice de Moran (GAMMA DESING SOFTWARE, 1998).

La función de correlación está relacionada con el semivariograma siempre que este disponga de meseta (Isaaks y Srivastaba, 1989, citados por VERA, 2004), por lo tanto, el autocorrelograma debería estar relacionado con el semivariograma ya que ambos modelos ajustados cuentan con meseta.

El índice de Moran es el procedimiento estadístico para calcular la dependencia espacial de una serie de datos o autocorrelación espacial. Es similar al índice de Geary, salvo que el de Moran utiliza los productos de los valores vecinos en vez de las diferencias (ANSELIN, 1995).

Un valor positivo indica una concentración de valores similares (altos o bajos), mientras que un valor negativo indicaría una concentración geográfica de valores diferentes (ANSELIN, 1995).

Según GAMMA DESING SOFTWARE (1998), se define la zona de dependencia espacial como, aquella que presenta el primer valor Moran negativos. En este caso para la primera profundidad encontramos que el rango de dependencia espacial esta dado por el primer valor negativo, en este caso es de 2931.59 m y en la

segunda profundidad es de 4552.65 m (Cuadros 4 y 5), con lo cual se demuestra que el fósforo adsorbido presenta dependencia espacial.

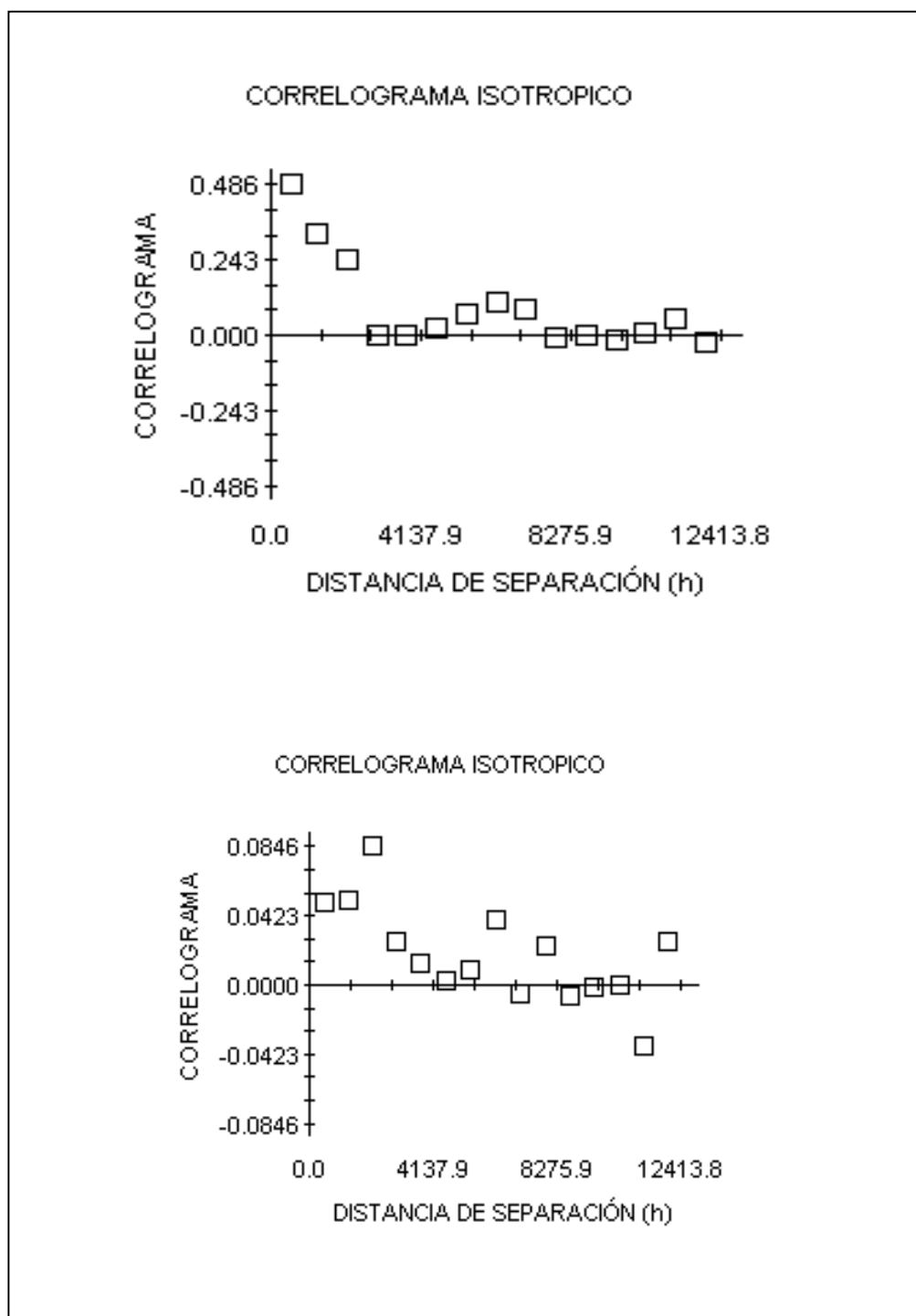


FIGURA 9: Correlogramas de retención de fósforo para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente.

CUADRO 4. Análisis de Moran de adsorción de fósforo para la profundidad de 0-10 cm.

Clases	Distancia promedio	Moran	Pares
1	535.83	0.5555	188
2	1287.37	0.344	419
3	2080.69	0.3012	603
4	2931.59	-0.0029	765
5	3723.88	-0.0049	1015
6	4552.64	-0.0221	1121
7	5378.97	0.0188	1146
8	6204.27	0.0339	1088
9	7037.48	0.0407	1123
10	7858.44	-0.0744	1080
11	8677.24	-0.1074	946
12	9498.91	-0.1222	825
13	10328.91	-0.1139	754
14	11168.16	-0.041	667
15	11983.15	-0.1163	526

CUADRO 5. Análisis de Moran de adsorción de fósforo para la profundidad de 10-20 cm.

Clases	Distancia promedio	Moran	Pares
1	535.83	0.0533	188
2	1287.37	0.0440	419
3	2080.69	0.0832	603
4	2931.59	0.0215	765
5	3723.88	0.0190	1015
6	4552.64	-0.0001	1121
7	5378.97	0.0006	1146
8	6204.27	0.0183	1088
9	7037.48	-0.0111	1123
10	7858.44	0.0091	1080
11	8677.24	-0.0128	946
12	9498.91	-0.0070	825
13	10328.91	-0.0256	754
14	11168.16	-0.0470	667
15	11983.15	0.0079	526

4.3 Análisis de superficie

Después de ajustar los semivariogramas al modelo teórico, se estimaron los valores de las concentraciones de fósforo retenido en los suelos no muestreados, mediante el método de interpolación kriging puntual, analizado a través del programa Surfer. Con los datos obtenidos se puede construir el mapa de contorno sobre la distribución de la cantidad de adsorción de fósforo en la serie de Pelchuquín.

Los mapas de suelos son representaciones de variabilidad de los mismos (Ovalle y Rey, 1995, citados por MARDONES, 2003). En particular, los mapas de isolíneas o de contorno, son definidos como representación gráfica planimétrica de un volumen tridimensional y cuyas líneas conectan puntos de igual valor, se utiliza para la presentación de atributos continuos de suelo (Dent, 1985, citado por MARDONES, 2003).

Como se puede ver en la Figura 10, hay zonas en las cuales se encuentran picos con altas concentraciones de retención de fósforo, los cuales decrecen hacia áreas contiguas. También encontramos sectores de baja concentración de fósforo retenido que aumentan hasta comunicarse con sectores de alta retención de fósforo. Esto se puede observar en forma muy similar para la profundidad de 10-20 cm (Figura 11), teniendo en consideración que los valores de retención de fósforo encontrados en esta profundidad son levemente mayor a la de superficie.

Se puede apreciar que no existe una dirección en las concentraciones de fósforo retenido, sino más bien, valores intercalados en toda la zona estudiada, lo que confirma la isotropía para ambas profundidades.

En este caso al comparar ambas profundidades, se observa que no existe continuidad espacial de la variable en estudio, esto se contrapone al análisis realizado por VERA (2004), en el cual, si obtuvo continuidad espacial en ambas profundidades, tomando como variable, el aluminio extractable.

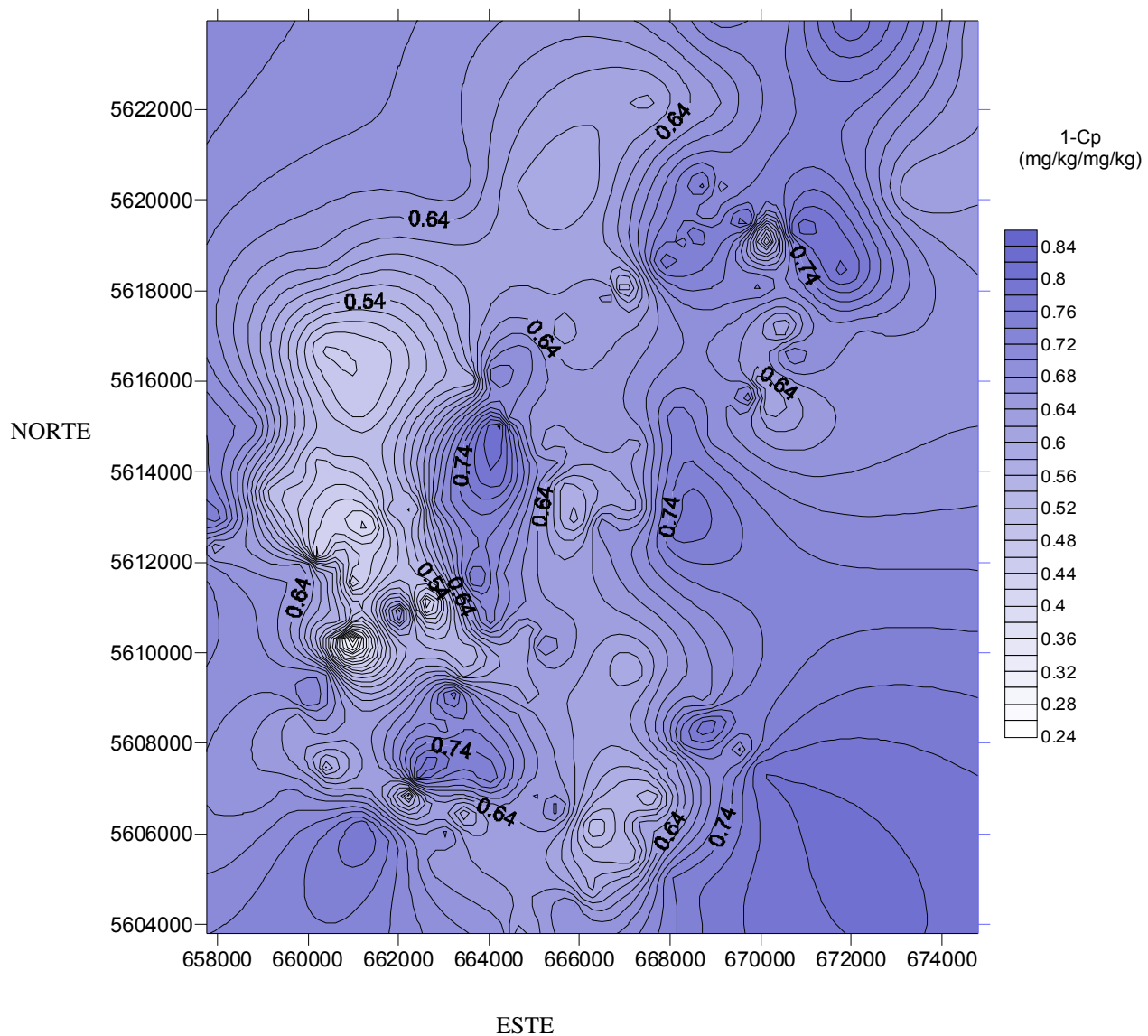


FIGURA 10: Mapa de contorno para capacidad de retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm.

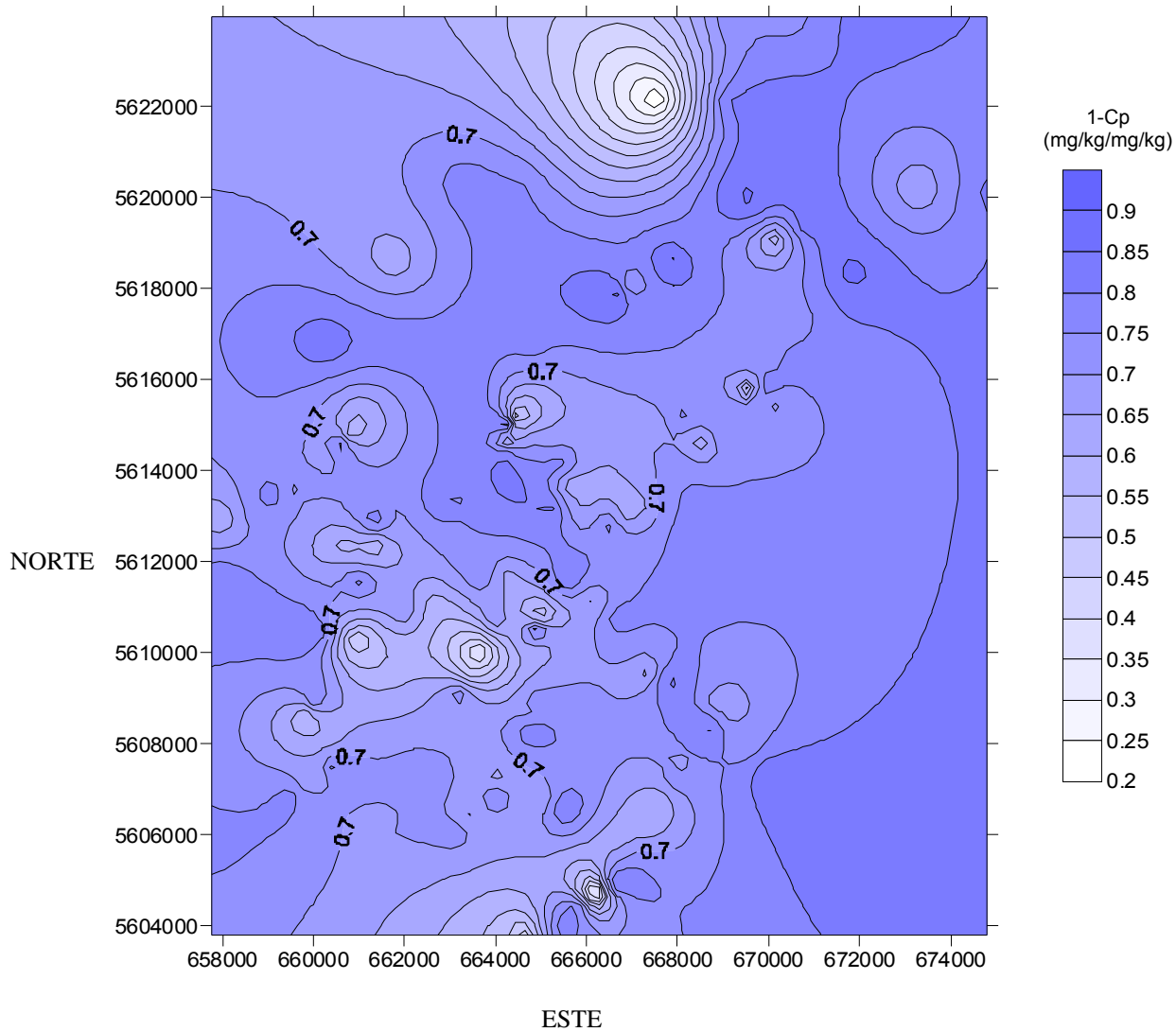


FIGURA 11: Mapa de contorno para capacidad de retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm.

4.4 Correlación entre aluminio extractable y capacidad de fijación de fósforo. A continuación se presenta los gráficos de correlación entre aluminio extractable y capacidad de fijación de fósforo para ambas profundidades (0-10 cm) y (10- 20 cm).

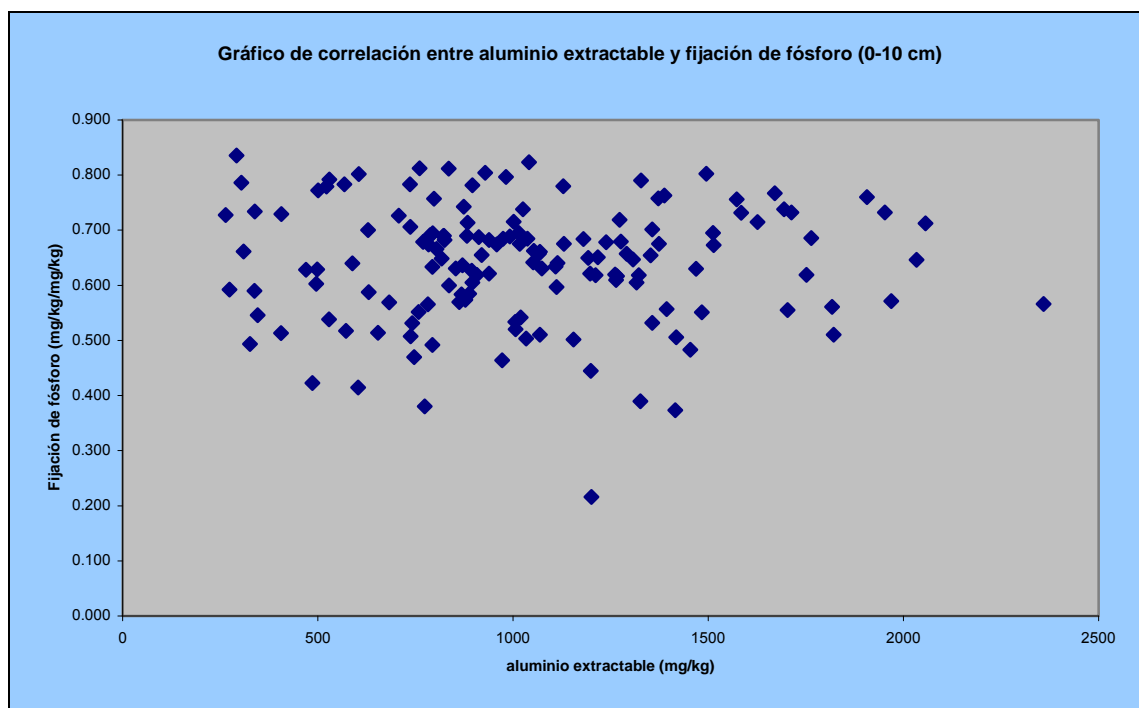


FIGURA 12: Gráfico de correlación entre aluminio extractable (mg/kg) y capacidad de fijación de fósforo (mg/kg/mg/kg) a la profundidad de 0-10 cm.

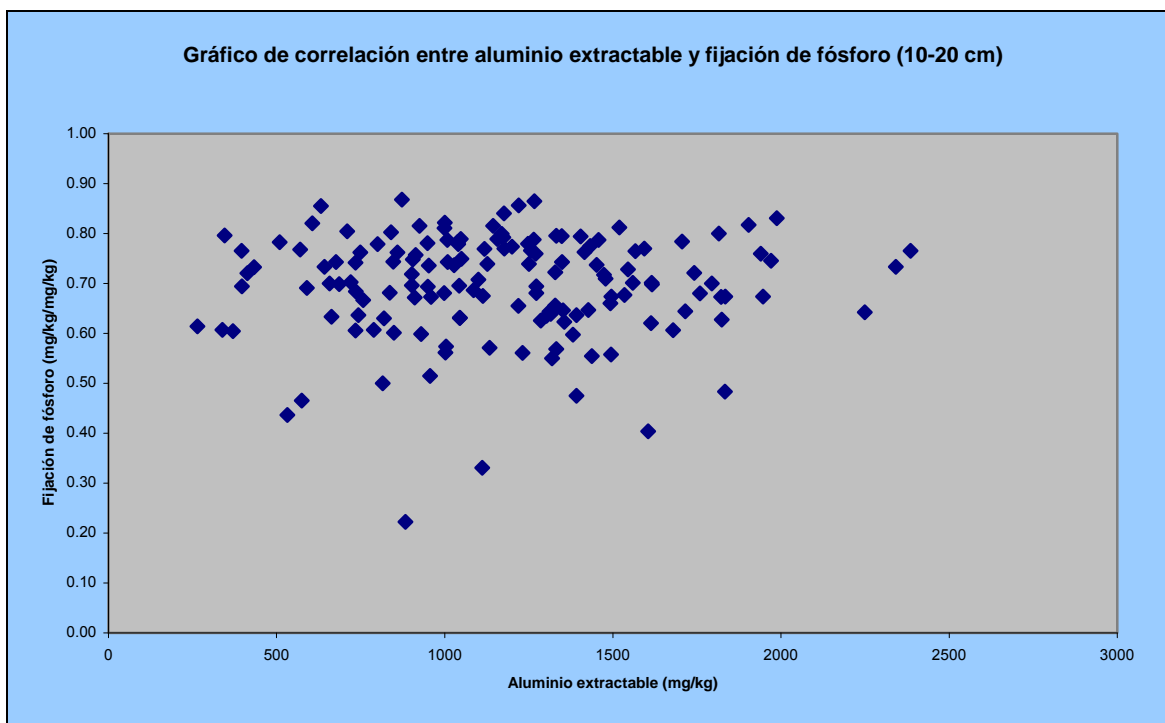


FIGURA 13: Gráfico de correlación entre aluminio extractable (mg/kg) y capacidad de fijación de fósforo (mg/kg/mg/kg) a la profundidad de 10-20 cm.

Como se puede observar en las Figuras 12 y 13, se determina claramente que no existe correlación entre las dos variables (aluminio extractable y fijación de fósforo). Esto se contrapone a lo expuesto en literatura, en la cual, se explica que existe una gran correlación entre aluminio extractable y capacidad de fijación de fósforo.

Se podría deber en cierta medida, a los contenidos de materia orgánica que se presentan en los suelos, ya que esta podría afectar la capacidad de retención de fósforo.

En el caso del r^2 , para ambos casos es bajo, para la profundidad de 0-10 cm es de 0,00005 y para la profundidad de 10-20 cm es de 0,0007.

En el Anexo 6, se pueden ver los datos de aluminio extractable para ambas profundidades, analizados por VERA (2004).

5. CONCLUSIONES

Los resultados indican isotropía para ambas profundidades, por lo tanto las concentraciones de retención de fósforo dentro de la zona estudiada, son solo dependientes de la distancia de separación entre ellas.

El análisis geoestadístico demostró la presencia de dependencia espacial, incrementándose en profundidad (de moderada a alta) con respecto a la adsorción de fósforo.

Se determinó que no existe correlación entre aluminio extractable y fijación de fósforo, en esta serie en particular.

No se puede determinar si existe continuidad espacial en profundidad, ya que los valores no presentan una marcada direccionalidad, que pueda permitir afirmar este comportamiento.

6 RESUMEN

Se determinó por medio de un análisis geoestadístico, la variabilidad y dependencia espacial de la fijación o retención de fósforo en un Andisol (serie Pelchuquín), perteneciente a la Región de los Ríos, con el objetivo de conocer la variabilidad espacial de la retención de fósforo en una serie de suelo considerada homogénea. Se seleccionó 169 puntos dentro del sector, muestreando a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), obtenido un total de 338 muestras.

Los datos fueron sometidos a un análisis estadístico tradicional y a un análisis geoestadístico. El análisis estadístico tradicional reveló promedios por sobre lo encontrado en literatura revisada. Los otros parámetros como desviación estándar, valores máximos y mínimos y el coeficiente de variación mostraron similitudes en ambas profundidades. La normalidad de datos fue determinada a través de los coeficientes de kurtosis y skewnes, observándose una distribución normal de los datos.

A continuación se efectuó un análisis geoestadístico, con lo cual, se confeccionó los semivariogramas, esto, para una mejor visualización de la distribución de los parámetros en estudio se realizó la construcción de mapas de contorno y superficie, utilizando el método de interpolación kriging puntual.

De los parámetros obtenidos del semivariograma se obtuvo para ambas profundidades que los datos presentan una distribución isotrópica (omnidireccional), es decir, dependiente solamente de la distancia de separación entre las muestras. Encontrándose para la profundidad de 0-10 cm una dependencia moderada, y para la profundidad de 10-20 cm una alta dependencia espacial, pero no encontrándose una clara dirección de las concertaciones de fósforo retenido.

El análisis demuestra que existe homogeneidad en las concentraciones de fósforo adsorbido, no obstante, no se puede considerar que exista una continuidad espacial en profundidad.

Para la correlación entre aluminio extractable y retención de fósforo, se observó que no presenta ninguna correlación, esto se podría deber a otras variantes, como por ejemplo la materia orgánica, la cual podría afectar los contenidos de fósforo retenido.

Se correlacionó la retención de fósforo con el Al extractable , determinado anteriormente sobre la misma muestra de suelo, se observó que no existe correlación entre ellas.

SUMMARY

The variability and spatial dependence of phosphorous fixation or retention was determined through geostatistical análisis of an Andisol, series Pelchuquín, from the XIV region , Chile with the object of knowing the variability and spatial distribution of the phosphorous retention in a soil series considered as a homogenous unit. An area of approximately 16000 hectares was sampled at 169 points, at two depths (0-10 and 10-20 cm), totalling 338 samples.

The data was submitted to a traditional statistical and geostatistical analysis. The average values of P- retention were somewhat higher than the ones found in literature. Standard deviation, maximum and minimum values, and the variation coefficient were similar at both depths. The normality of the data was determined by the coefficient of kurtosis and the skewness, which reflected a normal distribution of the values.

With the geostatistical analysis semivariograms were obtained and to visualise the distribution, surface contour maps were constructed by kriging.

The values obtained from the semivariogram showed that both depths had an isotropic distribution (omnidirectional), that is to say, only dependant on the distance between samples. For the 0-10 cm depth a dependence was shown for P- retention.

The analysis determined that there is homogeneity in the phosphorous absorbed, but there was no depth continuity.

Correlation between P-retention and extractable Al, determined in previous research with the same soil samples, was not visible.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ALAMOS, P., BEHRENS H., ACEVEDO., E., LOPEZ A. y PALMA T. 1967. Relaciones suelo-fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica, Chile 27(13):121-129.
- ANSELIN, L. 1995. Local indicator of Spatial Association – LISA, Geographical analysis. 93- 115 p.
- BONOMELLI, C, HENRIQUEZ, C., GIRAL, L. y BESCANSÁ, P. 2003. Disponibilidad de fósforo en un andisol, con distintas fuentes y dosis de fósforo, en condiciones controladas. Ciencia e Investigación Agraria, Chile 30 (3): 186-192.
- BURGOS P., MADEJÓN E., PÉREZ DE MORA A., GIRÓN I., y CABRERA F. 2003. Propiedades físico-químicas y variabilidad espacial de un suelo afectado por el vertido minero de Aznalcóllar. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC). <http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p219-222.pdf>. (13 julio 2004).
- DIAZ, A. 2006. Estudio de la homogeneidad del suelo Osorno mediante la variabilidad del aluminio extractable, utilizando geoestadística. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 77p.
- DIAZ-ZORITA, M.1999. Manejo de fósforo en sistemas de siembra directa. INTA. Argentina. <http://www.fertilizar.org.ar>. (17 de julio 2004).
- ECHEVERRÍA, J.C., MOLINERO, H.B., SERRA, J. A. y PEÑA, C. 1996. Evaluación de recursos naturales con geoestadística y kriging. IV jornada modelo ambiental. San Luis, Argentina. www.inta.gob.ar (2 agosto 2006).

- ESCRIBANO, C. y GONZALES, P. 2003. Análisis de la variabilidad estadística en algunas propiedades del suelo. IX. Conferencia española de biometría. La Coruña, España. <http://www.edc.es> (25 de agosto 2006).
- ESPINOSA, J. 1991. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. Quito. Ecuador. <http://www.ppi-ppic-ipi.org>. (7 de octubre 2005).
- ESPINOSA, J.1991. Efecto residual de fósforo en Andisoles. <http://www.redpav-fpolar.info.ve/fagro/v171a050.html>. (12 de septiembre2005).
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2003. Los principales factores ambientales y de suelos que influyen sobre la productividad y el manejo. <http://www.fao.org> (20 de febrero 2007).
- FASSBENDER, H. 1975. Química de suelo. Con énfasis en suelos de América latina. Primera edición. Turrialba, Costa Rica. 397 Pág.
- GARCIA, R. 2005. Estadística descriptiva. Madrid, España. www.aulafacil.com (14 de septiembre 2006).
- GALLARDO, A. 2004. Geoestadística. Revista Ecosistema. Sevilla. España. <http://www.revistaecosistema.net> (5 de septiembre 2006).
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION DE RECURSOS NATURALES y UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (CORFO-UACH). 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile. 178 p.
- ISAAKS, E. y SRIVASTAVA, R. 1989. An introduction to applied geostatistics, New York, Oxford University Press Inc. 561 p.

- JARA, C. 2002. Simposio internacional de geología ambiental para planificación del uso del territorio: usos actuales y potenciales de los depósitos sedimentarios del último interglaciar en Valdivia, X Región, Chile. <http://www.sernageomin.cl>. (25 de octubre 2005).
- JARAMAL. 2002. Variabilidad de las propiedades del suelo. <http://www.unalmed.edu.co>. (15 agosto 2006).
- KÜHNE, L y NISSEN, J. 1973. Estudio mineralógico, petrográfico y físico-hídrico de los principales suelos de la provincia de Valdivia. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias agrarias. 166p.
- MARDONES, R. 2003. Estudio de la variabilidad y dependencia de cationes intercambiables y pH en un suelo Andisol de la provincia de Valdivia. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 175 p.
- MATHERON, G. 1969. Cours de geostatistique. Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de Paris, Italia. 77 p.
- MELCHIORI, R., GARCÍA, F. y ECHEVERRÍA, H. 2003. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: I asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. Unidad Integrada INTA Balcarce-FCA Universidad Nacional del Mar del plata. Argentina. <http://www.agriculturaprecision.org>. (15 de enero 2006).
- MIRANDA, M. y CONDALL, A. 2003. Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio de Reserva Forestal Valdivia. Bosque (Valdivia) 24(2):29-42. <http://www.scielo.cl>. (15 agosto 2005).
- OPAZO, J. 1992. Fertilidad de suelos. Suelos, una visión actualizada del recurso. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 166 -169 pág.

- ORTEGA, R. y FLORES, L. 1999. Agricultura de precisión. Introducción al manejo sitio-específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA). CRI Quilamapu. Chillan, Chile. 146 p.
- OSORIO, N. 2003. Muestreo de suelo. Universidad nacional de Colombia. Medellín, Colombia. <http://www.unalmed.edu.co> . (7 de octubre 2005).
- PONCE, D., PABLOS, P., BALMACEDA, C. y HENRRIQUEZ. 1999. Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba. Bioagro 11(1):3-11.
- QUINTIN, J. 2003. Monografía. Geoestadística. Universidad de Pinar del Río. Cuba. cuador@info.upr.edu.cu (10 septiembre 2004).
- REGALADO, C; RITTER, A. 2005. Técnicas geoestadísticas para caracterizar la variabilidad espacial de la hidrofobicidad en la zona no saturada de una cuenca forestal. <http://www.zonanosaturada.com>. (13 de junio 2005).
- SADZAWKA, A., CARRASCO, M.; GREZ, R. y MORA, M. 2004. Comisión de normalización y acreditación (CNA). Sociedad Chilena de las Ciencias de Suelo. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Revisión 2004. 113 p.
- SALAZAR, O., CASANOVA, M., LUZIO, W. 2005. Correlation between world reference base and soil taxonomy for the soils from the Xth «Los Lagos» Region of Chile. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 2(1):35-45.
- SCHALSCHA, E.; NIETO, C. y BINGHAM, A. 1972. Algunas características de fijación de fosfatos en suelos alofanicos de Chile. Agricultura Técnica, Chile 33 (2): 81-86.

- SHOJI, S., NANZYU, M., y DAHLGREN, R. 1993. Volcanic ash soils, properties and utilization. *Developments in Soil Science*. Elsevier Science . Amsterdam, Nueva Zelanda. 288 p.
- TANNURE, C. y MAZZA, S. 2004. Caracterización geoestadística de la distribución espacial de *Alabama argillacea* Hübner (Lepidoptera:Noctuidae) en cultivo de algodónero. Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes, Argentina. www.unne.edu.ar (3 de julio 2006).
- TOSSO, J. 1985. Suelos Volcánicos de Chile, Primera edición. Santiago. Chile. 723 p.
- TRANGMAR, B., YOST, R. y UEHARA, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38:45-92.
- TRUEBA, L. 2001. Estadística no paramétrica. Universidad Autónoma de Zacatecas. México. <http://www.matematicas.reduaz.mx.htm>. (6 agosto 2006).
- ULLOA, M., VIDAL, E., INGARAMO, O., MORALES, L. y PAZ, A. 2003. Aplicación de la geoestadística en el estudio de las propiedades del suelo. Coruña, España. <http://www.1.unne.edu.ar>. (20 de junio 2006).
- VAZQUEZ, S. y MORALES, L. 2003. Adsorción de fósforo en suelos ácidos de Misiones (Argentina). Cátedra de Edafología. Facultad de Ciencias Agrarias-UNNE. Corrientes, Argentina. www.unne.ar. (10 de julio 2006).
- VERA, R. 2004. Estudio de la homogeneidad del aluminio extractable, de un Andisol de la X Región de Chile, utilizando parámetros geoestadísticos. Tesis Licenciado Agronomía Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 79 p.
- WEBSTER, R. y OLIVE, M. 2001. *Geostatistics for Enviromental Scientists*, New York, USA. 271 p.

ANEXOS

ANEXO 1. Concentraciones de retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm y sus respectivas coordenadas geográficas.

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
674797	5623837	10.246	118.503	0.36	0.64
674713	5620137	8.552	116.987	0.36	0.64
673364	5623869	9.245	88.798	0.27	0.73
673281	5620169	12.436	126.949	0.38	0.62
672253	5617068	11.101	108.590	0.32	0.68
671931	5623901	10.492	69.772	0.20	0.80
671808	5618351	15.224	72.005	0.19	0.81
670710	5619354	12.504	68.723	0.19	0.81
670667	5616611	10.328	92.096	0.27	0.73
670498	5623933	13.0211	99.510	0.29	0.71
670492	5617153	13.845	137.512	0.41	0.59
670154	5616125	8.059	114.121	0.35	0.65
670148	5619419	14.789	139.394	0.42	0.58
670112	5615492	13.012	134.013	0.40	0.60
670109	5619111	12.649	161.619	0.50	0.50
670025	5615994	10.232	138.828	0.43	0.57
669982	5618168	6.531	86.815	0.27	0.73
669966	5607427	12.612	72.104	0.20	0.80
669762	5615707	10.9427	83.533	0.24	0.76
669681	5619546	13.8644	66.907	0.18	0.82
669584	5615777	11.6697	97.944	0.29	0.71
669565	5619869	10.7719	87.915	0.26	0.74
669524	5607881	8.1423	105.624	0.32	0.68
669437	5615971	7.9926	104.475	0.32	0.68
669343	5615407	12.882	110.289	0.32	0.68
669099	5620281	12.145	105.191	0.31	0.69
669065	5623964	14.125	95.362	0.27	0.73
669041	5608533	2.1089	67.090	0.22	0.78
669025	5622114	17.652	121.235	0.35	0.65
668863	5614714	15.401	107.374	0.31	0.69
668795	5608895	8.5552	106.257	0.33	0.67
668792	5619677	10.2884	101.809	0.31	0.69
668746	5608399	10.2344	69.506	0.20	0.80
668727	5620349	12.011	80.301	0.23	0.77
668546	5614619	9.874	88.481	0.26	0.74
668522	5619218	11.1214	74.020	0.21	0.79
668443	5608054	10.1183	83.267	0.24	0.76
668399	5613471	11.6582	81.484	0.23	0.77
668375	5607892	9.2347	89.597	0.27	0.73

(Continua)

(Continuación Anexo 1)

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
668343	5619074	13.5442	94.679	0.27	0.73
668341	5608080	10.9947	82.150	0.24	0.76
668141	5607627	7.3978	114.937	0.36	0.64
668111	5615176	10.995	89.664	0.26	0.74
668088	5612615	14.3698	84.300	0.23	0.77
668065	5614142	8.6666	89.098	0.27	0.73
668000	5605066	12.001	89.647	0.26	0.74
667942	5607235	7.5566	122.051	0.38	0.62
667817	5618608	24.472	90.031	0.22	0.78
667769	5609404	14.113	122.168	0.36	0.64
667661	5613397	14.555	104.092	0.30	0.70
667609	5606752	12.664	158.603	0.49	0.51
667592	5622145	16.211	137.845	0.41	0.59
667533	5615086	10.399	106.607	0.32	0.68
667374	5606210	15.286	129.615	0.38	0.62
667358	5609571	9.7875	132.080	0.41	0.59
667264	5614624	20.168	131.014	0.37	0.63
667249	5613243	15.652	134.113	0.39	0.61
667141	5605528	7.9505	148.341	0.47	0.53
666963	5609843	15.443	138.461	0.41	0.59
666959	5618071	10.8835	155.638	0.48	0.52
666825	5612989	10.021	119.052	0.36	0.64
666749	5605712	11.395	145.925	0.45	0.55
666719	5617940	10.2653	115.054	0.35	0.65
666612	5610765	13.456	123.184	0.37	0.63
666611	5614656	11.28	114.138	0.34	0.66
666562	5604915	10.234	128.715	0.39	0.61
666451	5612846	15.621	110.306	0.32	0.68
666267	5606162	14.368	166.233	0.51	0.49
666203	5604727	16.037	145.342	0.43	0.57
666180	5611150	11.978	121.968	0.37	0.63
666120	5620326	10.0626	134.929	0.42	0.58
665961	5612927	7.1967	144.376	0.46	0.54
665814	5604442	12.026	105.191	0.31	0.69
665630	5611554	22.011	133.347	0.37	0.63
665615	5613688	10.2	140.610	0.43	0.57
665573	5616982	16.019	133.180	0.39	0.61
665571	5613974	10.924	121.701	0.37	0.63
665516	5606534	21.522	111.455	0.30	0.70
665464	5611485	15.884	130.315	0.38	0.62
665429	5603922	10.446	112.105	0.34	0.66
665381	5614179	5.569	101.993	0.32	0.68

(Continuación Anexo 1)

(Continuación Anexo 1)

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
665181	5614462	7.4656	118.419	0.37	0.63
665100	5610162	12.883	105.874	0.31	0.69
664994	5610781	9.2012	111.989	0.34	0.66
664988	5606789	11.394	122.834	0.37	0.63
664965	5610124	15.985	130.365	0.38	0.62
664931	5610524	11.577	131.631	0.40	0.60
664884	5614770	9.9562	111.239	0.34	0.66
664810	5608899	16.248	131.281	0.38	0.62
664787	5616646	15.675	108.307	0.31	0.69
664766	5608763	7.1232	110.739	0.35	0.65
664739	5608277	8.9681	110.689	0.34	0.66
664688	5620357	12.468	133.463	0.40	0.60
664603	5603802	17.633	136.795	0.40	0.60
664437	5610689	12.444	117.553	0.35	0.65
664411	5615161	10.882	106.124	0.32	0.68
664305	5603820	7.3474	105.191	0.33	0.67
664240	5611718	20.054	115.420	0.32	0.68
664227	5615038	19.887	69.222	0.16	0.84
664224	5613849	9.6652	70.605	0.20	0.80
664222	5614363	13.587	72.271	0.20	0.80
664218	5614660	16.645	73.087	0.19	0.81
664013	5607241	10.578	82.534	0.24	0.76
664005	5606923	18.022	106.257	0.29	0.71
663999	5610659	6.8009	91.114	0.28	0.72
663986	5616130	7.741	93.263	0.29	0.71
663672	5611635	5.9953	72.154	0.22	0.78
663661	5610041	9.8537	146.192	0.45	0.55
663658	5616000	9.447	146.991	0.46	0.54
663478	5606373	4.4515	134.546	0.43	0.57
663436	5606424	15.877	148.757	0.44	0.56
663386	5609469	5.3476	133.263	0.43	0.57
663256	5620387	3.662	99.910	0.32	0.68
663210	5609147	7.0222	71.988	0.22	0.78
663087	5606004	20.877	112.622	0.31	0.69
663082	5613360	19.255	105.091	0.29	0.71
662994	5608354	13.22	108.107	0.32	0.68
662866	5605420	4.1764	112.088	0.36	0.64
662782	5613308	6.725	100.943	0.31	0.69
662769	5607633	10.586	73.004	0.21	0.79
662635	5611057	9.9155	197.954	0.63	0.37
662413	5607222	7.5661	71.738	0.21	0.79
662380	5613240	10.664	157.470	0.49	0.51
662238	5606905	7.5943	162.652	0.52	0.48

(Continua)

(Continuación Anexo 1)

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
662022	5610864	5.0111	90.347	0.28	0.72
661830	5605960	9.6993	89.581	0.27	0.73
661827	5613100	17.221	155.688	0.46	0.54
661785	5618568	13.159	137.395	0.41	0.59
661746	5616718	5.2653	162.068	0.52	0.48
661554	5610701	9.1744	149.773	0.47	0.53
661348	5612388	18.6999	185.276	0.56	0.44
661338	5612845	10.051	195.972	0.62	0.38
661203	5606195	5.7157	71.771	0.22	0.78
661085	5615371	8.9398	169.832	0.54	0.46
660983	5611557	8.6044	184.176	0.59	0.41
660917	5610329	2.7698	238.021	0.78	0.22
660827	5614796	11.187	157.021	0.49	0.51
660787	5610590	4.1872	137.712	0.45	0.55
660765	5611467	7.1469	154.055	0.49	0.51
660695	5612313	13.788	166.317	0.51	0.49
660672	5609903	15.258	188.458	0.58	0.42
660596	5614541	17.335	161.202	0.48	0.52
660546	5611842	8.553	137.628	0.43	0.57
660525	5610635	8.847	140.527	0.44	0.56
660372	5609570	7.4995	100.926	0.31	0.69
660360	5607458	12.007	151.856	0.47	0.53
660353	5618598	9.1741	120.385	0.37	0.63
660342	5608182	6.1102	112.088	0.35	0.65
660314	5616748	10.204	173.597	0.54	0.46
660246	5614286	13.415	172.464	0.53	0.47
660221	5607347	7.9607	121.585	0.38	0.62
660207	5610452	10.8823	145.642	0.45	0.55
660202	5612179	9.111	192.306	0.61	0.39
660016	5608911	9.6192	91.763	0.27	0.73
659940	5611961	25.66	131.148	0.35	0.65
659878	5613846	17.586	165.267	0.49	0.51
659828	5608632	15.248	127.332	0.37	0.63
659811	5607073	12.055	110.189	0.33	0.67
659516	5606897	10.254	104.092	0.31	0.69
659496	5613637	12.845	162.335	0.50	0.50
659134	5613508	11.845	160.103	0.49	0.51
658957	5606884	12.268	112.522	0.33	0.67
658845	5614927	20.37	113.271	0.31	0.69
658602	5613088	3.1809	106.757	0.35	0.65
658014	5612937	14.551	87.398	0.24	0.76
657965	5612317	13.645	127.766	0.38	0.62

(Continua)

(Continuación Anexo 1)

657930	5611792	10.268	101.809	0.31	0.69
657753	5605784	16.664	111.289	0.32	0.68

**ANEXO 2. Concentraciones de retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm
y su respectivas coordenadas geográficas.**

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
674797	5623837	11.845	72.604	0.20	0.80
674713	5620137	22.645	80.401	0.19	0.81
673364	5623869	10.211	67.273	0.19	0.81
673281	5620169	18.002	122.984	0.35	0.65
672253	5617068	6.664	68.289	0.21	0.79
671931	5623901	18.312	71.921	0.18	0.82
671808	5618351	28.533	66.823	0.13	0.87
670710	5619354	12.333	67.690	0.18	0.82
670667	5616611	24.51	92.096	0.23	0.77
670498	5623933	4.1196	87.248	0.28	0.72
670492	5617153	20.6813	112.088	0.30	0.70
670154	5616125	6.211	81.334	0.25	0.75
670148	5619419	1.236	91.263	0.30	0.70
670112	5615492	7.223	101.343	0.31	0.69
670109	5619111	7.7331	139.211	0.44	0.56
670025	5615994	10.284	71.388	0.20	0.80
669982	5618168	5.1884	85.199	0.27	0.73
669966	5607427	6.877	54.778	0.16	0.84
669762	5615707	1.147	71.521	0.23	0.77
669681	5619546	8.5441	67.840	0.20	0.80
669584	5615777	2.775	160.336	0.53	0.47
669565	5619869	24.553	68.106	0.15	0.85
669524	5607881	1.185	88.298	0.29	0.71
669437	5615971	2.159	99.693	0.33	0.67
669343	5615407	12.884	88.481	0.25	0.75
669099	5620281	15.926	66.657	0.17	0.83
669065	5623964	11.8346	91.980	0.27	0.73
669041	5608533	6.184	96.495	0.30	0.70
669025	5622114	10.3664	72.788	0.21	0.79
668863	5614714	7.0682	88.098	0.27	0.73
668795	5608895	5.4795	103.292	0.33	0.67
668792	5619677	12.222	74.437	0.21	0.79
668746	5608399	10.425	66.823	0.19	0.81
668727	5620349	19.245	89.581	0.23	0.77
668546	5614619	5.2081	123.084	0.39	0.61
668522	5619218	6.312	77.636	0.24	0.76
668443	5608054	5.997	72.254	0.22	0.78
668399	5613471	3.326	73.587	0.23	0.77
668375	5607892	9	72.338	0.21	0.79

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
668343	5619074	5.0971	77.969	0.24	0.76
668341	5608080	6.3884	68.089	0.21	0.79
668141	5607627	5.0241	106.857	0.34	0.66
668111	5615176	19.246	91.330	0.24	0.76
668088	5612615	8.822	76.253	0.22	0.78
668065	5614142	4.5001	83.700	0.26	0.74
668000	5605066	5.2937	85.882	0.27	0.73
667942	5607235	6.531	83.600	0.26	0.74
667817	5618608	13.526	53.095	0.13	0.87
667769	5609404	12.399	65.924	0.18	0.82
667661	5613397	4.321	88.731	0.28	0.72
667609	5606752	10.9394	129.115	0.39	0.61
667592	5622145	2.194	242.653	0.80	0.20
667533	5615086	13.2694	111.355	0.33	0.67
667374	5606210	17.449	133.313	0.39	0.61
667358	5609571	8.886	121.235	0.37	0.63
667264	5614624	12.483	103.025	0.30	0.70
667249	5613243	1.184	110.289	0.36	0.64
667141	5605528	5.1274	88.731	0.28	0.72
666963	5609843	24.3955	114.038	0.30	0.70
666959	5618071	10.025	101.859	0.31	0.69
666825	5612989	1.8379	111.289	0.36	0.64
666749	5605712	6.444	113.771	0.36	0.64
666719	5617940	14.154	54.761	0.14	0.86
666612	5610765	12.021	78.285	0.22	0.78
666611	5614656	9.2973	112.588	0.34	0.66
666562	5604915	13.521	68.406	0.18	0.82
666451	5612846	12.057	81.218	0.23	0.77
666267	5606162	11.254	114.737	0.34	0.66
666203	5604727	5.1274	238.355	0.78	0.22
666180	5611150	7.7201	118.353	0.37	0.63
666120	5620326	1.0934	114.871	0.38	0.62
665961	5612927	16.278	122.001	0.35	0.65
665814	5604442	1.284	72.371	0.24	0.76
665630	5611554	7.1052	68.489	0.20	0.80
665615	5613688	3.6999	124.084	0.40	0.60
665573	5616982	5.0331	75.703	0.24	0.76
665571	5613974	1.1024	84.949	0.28	0.72
665516	5606534	10.006	63.758	0.18	0.82
665464	5611485	4.128	72.055	0.23	0.77
665429	5603922	21.996	85.749	0.21	0.79
665381	5614179	5.2698	71.438	0.22	0.78
665282	5613175	9.9852	68.589	0.20	0.80
665181	5614462	2.1169	93.263	0.30	0.70

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
665100	5610162	1.1653	107.074	0.35	0.65
664994	5610781	5.0324	160.119	0.52	0.48
664988	5606789	5.0324	113.371	0.36	0.64
664965	5610124	5.122	115.204	0.37	0.63
664931	5610524	10.139	66.923	0.19	0.81
664884	5614770	11.2355	107.007	0.32	0.68
664810	5608899	6.5977	85.366	0.26	0.74
664787	5616646	7.342	76.953	0.23	0.77
664766	5608763	5.2896	103.692	0.33	0.67
664739	5608277	8.5763	72.271	0.21	0.79
664688	5620357	12.884	89.114	0.25	0.75
664603	5603802	10.5231	189.324	0.60	0.40
664437	5610689	3.2145	122.901	0.40	0.60
664411	5615161	3.2544	163.635	0.53	0.47
664305	5603820	5.9789	151.573	0.49	0.51
664240	5611718	1.493	110.606	0.36	0.64
664227	5615038	19.796	62.925	0.14	0.86
664224	5613849	18.5233	73.820	0.18	0.82
664222	5614363	7.168	67.256	0.20	0.80
664218	5614660	5.2084	133.130	0.43	0.57
664013	5607241	5.6889	116.453	0.37	0.63
664005	5606923	15.2084	92.263	0.26	0.74
663999	5610659	8.183	97.411	0.30	0.70
663986	5616130	5.556	84.583	0.26	0.74
663672	5611635	8.249	84.649	0.25	0.75
663661	5610041	7.4363	208.283	0.67	0.33
663658	5616000	6.7292	71.955	0.22	0.78
663478	5606373	3.182	101.160	0.33	0.67
663436	5606424	5.199	112.088	0.36	0.64
663386	5609469	6.7829	156.737	0.50	0.50
663256	5620387	12.5128	78.785	0.22	0.78
663210	5609147	6.9311	88.398	0.27	0.73
663087	5606004	4.8965	84.949	0.27	0.73
663082	5613360	8.6395	86.949	0.26	0.74
662994	5608354	4.1029	110.906	0.36	0.64
662866	5605420	4.1211	102.059	0.33	0.67
662782	5613308	5.2145	65.424	0.20	0.80
662769	5607633	7.1886	91.913	0.28	0.72
662635	5611057	15.52	147.341	0.44	0.56
662413	5607222	9.8904	86.765	0.26	0.74
662380	5613240	5.743	82.850	0.26	0.74
662238	5606905	9.9478	99.943	0.30	0.70
662022	5610864	1.2884	93.113	0.31	0.69
661830	5605960	15.0984	104.708	0.30	0.70

Este	Norte	P inicial (mg/kg)	P final (mg/kg)	Cp (mg/kg/mg/kg)	1-Cp (mg/kg/mg/kg)
661827	5613100	12.92	105.524	0.31	0.69
661785	5618568	3.9924	120.252	0.39	0.61
661746	5616718	15.2899	77.919	0.21	0.79
661554	5610701	1.882	114.871	0.38	0.62
661348	5612388	4.1887	137.895	0.45	0.55
661338	5612845	9.1555	72.987	0.21	0.79
661203	5606195	4.1659	100.077	0.32	0.68
661085	5615371	1.298	119.419	0.39	0.61
660983	5611557	5.1829	74.220	0.23	0.77
660917	5610329	3.888	172.997	0.56	0.44
660827	5614796	5.731	135.213	0.43	0.57
660787	5610590	1.5109	122.351	0.40	0.60
660765	5611467	9.2551	96.995	0.29	0.71
660695	5612313	10.037	138.711	0.43	0.57
660672	5609903	2.5182	135.163	0.44	0.56
660596	5614541	4.9526	68.256	0.21	0.79
660546	5611842	9.111	104.775	0.32	0.68
660525	5610635	3.264	114.188	0.37	0.63
660372	5609570	2.0546	99.060	0.32	0.68
660360	5607458	3.5402	74.953	0.24	0.76
660353	5618598	4.8831	94.579	0.30	0.70
660342	5608182	17.201	135.063	0.39	0.61
660314	5616748	21.5966	67.573	0.15	0.85
660246	5614286	14.225	120.302	0.35	0.65
660221	5607347	4.9326	103.092	0.33	0.67
660207	5610452	6.623	71.621	0.22	0.78
660202	5612179	7.1299	118.852	0.37	0.63
660016	5608911	3.2585	83.367	0.27	0.73
659940	5611961	10.1	110.073	0.33	0.67
659878	5613846	12.12	90.331	0.26	0.74
659828	5608632	2.4115	137.378	0.45	0.55
659811	5607073	3.2645	99.027	0.32	0.68
659516	5606897	7.395	76.436	0.23	0.77
659496	5613637	5.0271	99.860	0.32	0.68
659134	5613508	2.211	68.023	0.22	0.78
658957	5606884	4.2646	81.817	0.26	0.74
658845	5614927	8.3655	86.432	0.26	0.74
658602	5613088	1.1235	84.300	0.28	0.72
658014	5612937	3.215	121.851	0.40	0.60
657965	5612317	4.1021	95.762	0.31	0.69
657930	5611792	3.2154	68.106	0.22	0.78
657753	5605784	8.0344	80.135	0.24	0.76

ANEXO 3. Tabla de ángulos de rotación para análisis de anisotropía para retención de fósforo a la profundidad de 0-10 cm.

0 -10 cm		
Anisotropía		
Ángulo	r²	Proporción C/(C0+C)
22,5	0,342	0,702
30	0,366	0,682
40	0,366	0,682
50	0,437	0,71
60	0,436	0,666
70	0,468	0,647
80	0,441	0,61
90	0,492	0,635
100	0,492	0,635
110	0,492	0,635
120	0,492	0,635
130	0,492	0,635
140	0,492	0,635
150	0,492	0,635
160	0,492	0,635
170	0,492	0,635
180	0,492	0,635
190	0,492	0,635
200	0,492	0,635
210	0,492	0,635
220	0,492	0,635
230	0,492	0,635
240	0,492	0,635
250	0,492	0,635
260	0,492	0,635
270	0,492	0,635
280	0,441	0,61
290	0,468	0,647
300	0,436	0,666
310	0,437	0,71
320	0,366	0,682
330	0,342	0,702
340	0,229	0,706
350	0,198	0,735
360	0	0

ANEXO 4. Tabla de ángulos de rotación para análisis de anisotropía para retención de fósforo a la profundidad de 10-20 cm.

10-20 cm		
Anisotropía		
Ángulo	r²	Proporción C/(C0+C)
22,5	0,347	0,644
30	0,404	0,64
40	0,394	0,658
50	0,441	0,649
60	0,461	0,644
70	0,495	0,654
80	0,539	0,652
90	0,539	0,652
100	0,539	0,652
110	0,539	0,652
120	0,539	0,652
130	0,539	0,652
140	0,539	0,652
150	0,539	0,652
160	0,539	0,652
170	0,539	0,652
180	0,539	0,652
190	0,539	0,652
200	0,539	0,652
210	0,539	0,652
220	0,539	0,652
230	0,539	0,652
240	0,539	0,652
250	0,539	0,652
260	0,539	0,652
270	0,539	0,652
280	0,495	0,654
290	0,461	0,644
300	0,441	0,49
310	0,394	0,658
320	0,389	0,643
330	0,404	0,64
340	0,255	0,664
350	0,172	0,633
360	0	0

ANEXO 5. Resultados para análisis de anisotropía para retención de fósforo a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente.

Profundidad (cm)	modelo	Nugget (Co)	Sill (Co+C)	Rango menor (m)	Rango mayor (m)	r ²	Proporción Co/(Co+C)
0-10	Lineal	0.008300	0.027884	46380.000	46380.000	0.26	0.297
10-20	Gausiano	0.021600	0.060672	29063.81	97774.268	0.347	0.356

ANEXO 6. Datos de aluminio extractable para serie Pelchuquín.

Norte	Este	Al extractable (mg/kg) (0-10 cm)	AL extractable (mg/kg) (10-20 cm)
5620349	668727	501.09	2384.92
5620281	669099	823.18	1987.12
5619869	669565	873.72	632.24
5619677	668792	1014.98	1174.95
5619546	669681	1040.89	840.5
5619419	670148	887.33	1794.05
5619354	670710	760.43	925.11
5619218	668522	1328.19	749.46
5619111	670109	1033.77	1001.79
5619074	668343	406.56	914.08
5618608	667817	895.72	873.07
5618168	669982	1952.67	642.86
5618071	666959	572.48	949.78
5617940	666719	1217.27	1266.99
5617153	670492	629.97	1043.62
5617068	672253	1373.97	1347.75
5616982	665573	1264.33	1566.66
5616646	664787	787.64	570.57
5616611	670667	263.68	1432.22
5616130	663986	1626.58	1027.79
5616125	670154	2033.67	1049.58
5616000	663658	1020.07	509.25
5615994	670025	1968.45	345.13
5615971	669437	1238.2	1113.16
5615777	669584	2056.6	1391.29
5615707	669762	1372.01	395.82
5615492	670112	1111.1	1086
5615407	669343	1017.59	905.19
5615371	661085	972.05	1678.49
5615176	668111	1025.34	1270.87
5615161	664411	824.87	574.59
5615157	660983	603.08	1592.96
5615086	667533	1275.94	1821.31
5615038	664227	291.57	1220.54
5614796	660827	653.72	1331.5
5614770	664884	1053.52	998.45
5614660	664218	834.95	1004.39
5614656	666611	1291.09	1328.31
5614624	667264	853.54	1615.69
5614619	668546	1694.19	338.61
5614541	660596	1006.36	1156.64
5614462	665181	1469.08	902.16

Norte	Este	Al extractable (mg/kg) (0-10 cm)	AL extractable (mg/kg) (10-20 cm)
5614363	664222	928.82	1815.32
5614286	660246	746.57	1351.21
5614179	665381	769.65	1247.86
5614142	668065	1584.49	952.64
5613974	665571	1073.98	412.9
5613849	664224	981.84	1144.13
5613846	659878	737.47	1126.75
5613688	665615	781.85	929.57
5613637	659496	1154.88	736.17
5613508	659134	1418.1	948.61
5613471	668399	1670.15	1256.08
5613397	667661	1356.29	902.16
5613360	663082	883.92	1250.8
5613308	662782	1763.81	1169.61
5613243	667249	1316.53	1391.361
5613240	662380	1821.5	1348.41
5613175	665282	1197.58	709.99
5613100	661827	528.73	589.87
5613088	658602	919.95	1328.66
5612989	666825	870.86	1302.74
5612937	658014	797.73	370.52
5612846	666451	974.36	1118.36
5612845	661338	773.77	1008.15
5612615	666088	867.75	1613.3
5612388	661348	1199.15	1437.42
5612317	657965	1261.43	397.15
5612313	660695	793.36	1134.02
5612179	660202	1326.23	1823.69
5611961	659940	817.37	757.79
5611842	660546	862.27	836.88
5611792	657930	1512.03	1705.67
5611718	664240	938.91	743.58
5611635	663672	521.97	1970.01
5611554	665630	498.71	1331.77
5611485	665464	1321.87	1199.76
5611467	660765	1068.63	1100.53
5611150	666180	793.85	1045.11
5611057	662635	1415.34	1231.64
5610864	662022	1001.55	1272.8
5610781	664994	1066.59	1833.53
5610765	666612	1108.81	1040.07
5610701	661554	742.04	1355.05
5610689	664437	1192.29	848.85

Norte	Este	Al extractable (mg/kg) (0-10 cm)	AL extractable (mg/kg) (10-20 cm)
5610659	663999	1272.88	720.39
5610635	660525	1817.24	819.73
5610590	660787	1703.27	1380.87
5610524	664931	836.43	999.22
5610452	660207	1484	1039.05
5610329	660917	1200.68	532.15
5610162	665100	882.13	1426.62
5610124	664965	1751.42	663.82
5610041	663661	345.54	1111.48
5609903	660672	486.19	1493.93
5609843	666963	337.67	1559.36
5609571	667358	273.62	1286.03
5609570	660372	991.67	1534.12
5609469	663386	877.72	815.82
5609404	667769	588.22	1000.68
5609147	663210	735.71	1544.77
5608911	660016	707.32	432.7
5608899	664810	1266.78	1451.8
5608895	668795	783.3	1495.59
5608763	664766	1352.1	911.29
5608632	659828	894.27	1318.96
5608533	669041	568.43	685.88
5608399	668746	1495.11	1519.42
5608354	662994	1180.63	1714.89
5608277	664739	1069.03	1264.96
5608182	660342	1307.39	788.55
5608080	668341	1387.52	1404.17
5608054	668443	1572.57	800.31
5607892	668375	1713.44	1047.98
5607881	669524	1130.69	1478.19
5607633	662769	529.74	1473.57
5607627	668141	1051.5	1492.7
5607458	660360	1005.81	859.56
5607427	669966	604.72	1176.78
5607347	660221	938.77	959.56
5607241	664013	1906.82	1044.66
5607235	667942	1211.3	1008.43
5607222	662413	304.01	847.43
5607073	659811	1513.98	1272.76
5606923	664005	736.7	676.92
5606905	662238	1454.11	657.23
5606897	659516	911.98	1177.61
5606884	658957	804.48	734.42

Norte	Este	Al extractable (mg/kg) (0-10 cm)	AL extractable (mg/kg) (10-20 cm)
5606789	664988	470.07	1315.83
5606752	667609	405.76	734.4
5606534	665516	629.08	606.39
5606424	663436	1393.8	1311.93
5606373	663478	2359.18	1946.06
5606210	667374	907.1	264.45
5606195	661203	1128.36	1758.75
5606162	666267	326.44	1219.16
5606004	663087	794.3	2341.22
5605960	661830	338.54	1615.37
5605784	657753	1036.97	1939.83
5605712	666749	757.87	2248.9
5605528	667141	1356.87	1741.48
5605420	662866	1114.2	1834.01
5605066	668	940.35	1414.01
5604915	666562	896.15	1903.68
5604788	657231	940.21	1122.34
5604727	666203	682.91	883.5
5604442	665814	821.23	1415.2
5603922	665429	309.88	1457.32
5603820	664305	957.93	956.85
5603802	664603	495.85	1604.64